

**ELABORACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS A
PARTIR DE LA MEZCLA DE DOS BIOMASAS RESIDUALES, UN
AGLOMERANTE A BASE DE YUCA Y CARBÓN MINERAL, PROPIOS
DEL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA**



**HERNANDO JOSÉ MACEA GUZMÁN
JORGE MARIO PASTRANA NARVÁEZ**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA, CÓRDOBA**

2016

**ELABORACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS A
PARTIR DE LA MEZCLA DE DOS BIOMASAS RESIDUALES, UN
AGLOMERANTE A BASE DE YUCA Y CARBÓN MINERAL, PROPIOS
DEL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA**

**HERNANDO JOSÉ MACEA GUZMÁN
JORGE MARIO PASTRANA NARVÁEZ**

**Trabajo de grado presentado, en la modalidad de trabajo de investigación,
como parte de los requisitos para optar al Título de Ingeniero Mecánico.**

Director:

Ing. YAHIR ENRIQUE GONZALEZ DORIA, MSc

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA, CÓRDOBA**

2016

**La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados
del proyecto, serán responsabilidad de los autores.**

Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Dedicatoria

A Dios, por haberme brindado todas las herramientas necesarias para finalizar esta maravillosa carrera.

A mis padres Hernando Macea y Bertha Guzmán, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, por ese gran esfuerzo que hicieron durante todos estos años para que yo pudiera llevar a cabo mis estudios, todo se lo debo a ellos.

A mi hermana Leidy, a todos mis abuelos, tíos, primos y amigos que de alguna u otra manera aportaron su granito de arena durante mi formación profesional.

A la Universidad de Córdoba, por haberme permitido ser parte de ella y así poder estudiar mi carrera. De igual manera dedico esta tesis a todos aquellos grandes maestros que me brindaron su conocimiento y motivación para seguir adelante día a día.

HERNANDO JOSÉ MACEA GUZMÁN

A Dios primero que todo, quien siempre estuvo acompañándome a lo largo de todo mi proceso de formación.

A mi mamá, quien ha hecho hasta lo imposible por brindarme educación y a quien le debo todo lo que soy.

A mi abuela, quien, a pesar de su edad, luchó a mi lado y me brindó todo su apoyo incondicional.

A mi novia, mis hermanos, amigos, compañeros, docentes y a todos aquellos que siempre estuvieron a mi lado a pesar de las adversidades.

JORGE MARIO PASTRANA NARVÁEZ

Agradecimientos

Agradecemos a todo el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Córdoba, por ser los artífices de nuestra formación profesional.

A todos nuestros amigos y compañeros dentro y fuera de la institución, por estar a nuestro lado en todo momento y brindarnos su apoyo incondicional.

A nuestros padres y demás familiares quienes nos brindaron los medios y la confianza necesaria para atravesar un camino difícil y lleno de obstáculos.

Al departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana, en especial al Ph.D Jorge Mario Mendoza Fandiño por permitirnos hacer uso de sus equipos e instalaciones para llevar a cabo la presente investigación y por toda la información suministrada, así como también a personas como Ezequiel Llanos, Fabio Hoyos y Rafael Emiro Cogollo, quienes siempre nos brindaron su ayuda para la ejecución de muchas de las actividades realizadas.

Agradecemos en gran manera al M.Sc. Yahír Enrique González Doria por ser nuestro orientador y director en el desarrollo de este proyecto. Sus enseñanzas siempre han sido un gran aporte a nuestra formación, no solo como futuros ingenieros mecánicos, sino también como investigadores.

Tabla de contenido

Resumen	14
Abstract.....	15
Introducción	16
Objetivos	18
Objetivo general	18
Objetivos específicos	18
1. Revisión de la literatura.....	19
1.1 Biomasa.....	20
1.1.1 Tipos de biomasa.....	20
1.2 Briquetas	21
1.3 Aglomerante.....	22
1.3.1 Tipos y propiedades de los aglutinantes.....	22
1.3.1.1 Almidones	24
1.3.1.2 Almidón de yuca	24
1.3.1.3 Utilización del almidón de yuca.....	25
1.4 Presión de compactación.....	26
1.5 Poder calorífico	26
1.8 Carbón.....	26
1.8.1 Tipos de carbón	26
1.8.2 Problemas ambientales.....	28
1.9 Diseño de experimentos	29
1.9.1 Diseño simplex reticular	29
1.9.2 Superficies de respuesta.	30
1.10 Estado del arte	30
2. Materiales y métodos	34
2.1 Caracterización física y química	35
2.1.1 Obtención de materias primas	35
2.1.2 Análisis próximo y elemental	35
2.1.3 Molienda	36
2.1.4 Tamizado.....	36
2.1.5 Determinación de la densidad	39
2.1.6 Aglomerante utilizado.....	40
2.1.7 Contenido de humedad en los factores.....	41
2.2 Realización ensayos de compresión y durabilidad mecánica, y determinación analítica del poder calorífico y las emisiones de azufre a cada briqueta	41
2.2.1 Diseño del experimento.....	41

2.2.2 Máquina briqueteadora	43
2.2.3 Elaboración de las briquetas	44
2.2.4 Pruebas experimentales	46
2.2.4.1 Prueba durabilidad mecánica	46
2.2.4.2 Prueba de resistencia a la compresión.....	47
2.2.5 Calculo analítico del poder calorífico y emisiones de azufre de las briquetas	49
2.3 Determinación de las mezclas favorables	50
3. Resultados y discusiones	52
3.1 Resultados experimentales de la caracterización fisicoquímica	53
3.1.1 Análisis próximo y elemental	53
3.1.2 Densidad.....	53
3.1.3 Contenido de humedad.....	54
3.2 Resultados obtenidos en las pruebas experimentales y analíticas.....	55
3.2.1 Diseño experimental.....	55
3.2.2 Resultados experimentales	56
3.2.2.1 Durabilidad mecánica	56
3.2.2.2 Modelo de regresión.....	57
3.2.2.3 Superficies de respuesta y gráfico de contorno.....	58
3.2.3.1 Resistencia a la compresión	59
3.2.3.2 Modelo de regresión.....	60
3.2.3.3 Superficie de respuesta y gráfico de contorno	61
3.2.3 Resultados analíticos del poder calorífico y emisiones de azufre de las briquetas	62
3.2.3.1 Poder calorífico	62
3.2.3.2 Superficie de respuesta y gráfico de contorno	63
3.2.3.1 Emisiones de azufre.	65
3.2.3.2 Superficie de respuesta y gráfico de contorno	65
3.2.4 Aglomerante de yuca.....	66
3.2.5 Relación entre durabilidad y % de carbón	67
3.2.6 Relación entre durabilidad y la fibra de coco.....	68
3.2.7 Relación entre durabilidad y la cascarilla de arroz	68
3.2.8 Resumen.....	69
3.3 Mezclas favorables.....	70
4. Conclusiones	72
5. Recomendaciones	74
6. Bibliografía	75
Anexos	78

Anexos A – Prueba de durabilidad mecánica	78
Anexos B – Prueba de resistencia a la compresión.....	88
B1 – Briquetas utilizadas en la prueba de compresión	88
B1 – Apariencia de las briquetas luego de la prueba de compresión.....	90
Anexo C – Resultados de las variables de respuesta.....	92
Anexo D– Relación entre el aglomerante y las variables de respuesta.....	93
Anexo E- precisión de los modelos de regresión	96
E1- Modelo de regresión para la durabilidad mecánica de briquetas.	96
E2- Modelo de regresión para la resistencia a compresión de las briquetas.....	96

Lista de tablas

Tabla 1: Factores y variables de respuesta.....	42
Tabla 2: Rangos de trabajo para el contenido de cada factor.....	42
Tabla 3: Requisitos de resistencia a la compresión para briquetas en función de su masa.....	48
Tabla 4: Resultados de los análisis próximo y elemental para las materias primas..	53
Tabla 5: Densidad promedio de las biomásas y el carbón.	54
Tabla 6: Humedad promedio de las biomásas y el carbón.....	54
Tabla 7: Batería de ensayos arrojada por el diseño experimental.....	55
Tabla 8: Resumen de los valores obtenidos para cada variable de respuesta.	69
Tabla 9: Parámetros de optimización.....	70
Tabla 10: Mezclas favorables según la optimización.	70

Lista de gráficos

Gráfica 1: Resultados de la prueba de durabilidad mecánica para cada corrida.....	57
Gráfica 2: Superficie de respuesta para la durabilidad mecánica.	58
Gráfica 3: Gráfico de contorno para la durabilidad mecánica.	59
Gráfica 4: Resultados de la prueba de compresión para cada corrida.	60
Gráfica 5: Superficie de respuesta para la resistencia a la compresión.	61
Gráfica 6: Gráfico de contorno para la resistencia a la compresión.	62
Gráfica 7: Resultados del cálculo del poder calorífico para cada corrida.	63
Gráfica 8: Superficie de respuesta para el poder calorífico.	64
Gráfica 9: Gráfico de contorno para el poder calorífico.	64
Gráfica 10: Resultados del cálculo de emisiones de azufre para cada corrida.	65
Gráfica 11: Superficie de respuesta para las emisiones de azufre.	66
Gráfica 12: Gráfico de contorno para las emisiones de azufre.	66
Gráfica 13: Durabilidad mecánica vs contenido de carbón.	67
Gráfica 14: Durabilidad mecánica vs contenido de fibra de coco.	68
Gráfica 15: Durabilidad mecánica vs contenido de cascarilla de arroz.	69
Gráfica 16: Relación entre la durabilidad mecánica y el contenido de aglomerante.	93
Gráfica 17: Relación entre la resistencia a compresión y el contenido de aglomerante.	93
Gráfica 18: Relación entre el poder calorífico y el contenido de aglomerante.....	94
Gráfica 19: Relación entre las emisiones de azufre y el contenido de aglomerante.	94
Gráfica 20: Precisión del modelo de regresión para la durabilidad mecánica de las briquetas.	96
Gráfica 21: Precisión del modelo de regresión para la resistencia a compresión de las briquetas.....	97

Lista de figuras

Figura 1: Principales geometrías de las briquetas.....	22
Figura 2: Almidón en polvo.....	25
Figura 3: Esquema del sistema triangular de coordenadas para una superficie de respuesta.....	29
Figura 4: Sistema triangular de coordenadas para un diseño simplex reticular.....	30
Figura 5: Carbón mineral.....	35
Figura 6: Molino de martillos.....	36
Figura 7: Tamiz ASTM N°16.....	37
Figura 8: Falla estructural en las briquetas debido al inadecuado tamaño de partículas.....	37
Figura 9: Tamiz ASTM N°40.....	38
Figura 10: Tamiz ASTM N°30.....	38
Figura 11: Biomásas y carbón tamizados. a) Fibra de coco, b) cascarilla de arroz, c) carbón.....	39
Figura 12: Medición de la masa para el cálculo de la densidad.....	40
Figura 13: Bioaglomerante natural de yuca.....	41
Figura 14: Medidor de humedad.....	41
Figura 15: Máquina briqueteadora manual.....	43
Figura 16: Preparación de la mezcla.....	44
Figura 17: Máquina briqueteadora y sus componentes.....	45
Figura 18: Medición de la presión interna en el aceite del gato hidráulico.....	45
Figura 19: Briqueta terminada.....	46
Figura 20: Máquina para ensayos de durabilidad mecánica.....	46
Figura 21: Briquetas antes y después de la prueba de durabilidad.....	47
Figura 22: Máquina de compresión inconfinaada.....	48
Figura 23: Máquina para ensayos a compresión PINZUAR.....	49
Figura 24: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #1.....	78
Figura 25: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #2.....	78
Figura 26: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #3.....	78
Figura 27: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #4.....	78
Figura 28: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #5.....	79
Figura 29: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #6.....	79
Figura 30: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #7.....	79
Figura 31: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #8.....	79
Figura 32: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #9.....	80
Figura 33: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #10.....	80
Figura 34: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #11.....	80
Figura 35: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #12.....	80
Figura 36: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #13.....	81
Figura 37: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #14.....	81
Figura 38: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #15.....	81
Figura 39: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #16.....	81
Figura 40: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #17.....	82
Figura 41: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #18.....	82
Figura 42: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #19.....	82
Figura 43: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #20.....	82
Figura 44: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #21.....	83
Figura 45: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #22.....	83

Figura 46: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #23.....	83
Figura 47: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #24.....	83
Figura 48: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #25.....	84
Figura 49: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #26.....	84
Figura 50: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #27.....	84
Figura 51: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #28.....	84
Figura 52: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #29.....	85
Figura 53: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #30.....	85
Figura 54: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #31.....	85
Figura 55: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #32.....	85
Figura 56: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #33.....	86
Figura 57: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #34.....	86
Figura 58: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #35.....	86
Figura 59: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #36.....	86
Figura 60: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #37.....	87
Figura 61: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #38.....	87
Figura 62: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #39.....	87
Figura 63: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #40.....	87
Figura 64: Briquetas para prueba de compresión. a) corrida #1, b) corrida #2, c) corrida #3, d) corrida #4, e) corrida #5.	88
Figura 65: Briquetas para prueba de compresión. a) corrida #6, b) corrida #7, c) corrida #8, d) corrida #9, e) corrida #10.	88
Figura 66: Briquetas para prueba de compresión. a) corrida #11, b) corrida #12, c) corrida #13, d) corrida #14, e) corrida #15.	88
Figura 67: Briquetas para prueba de compresión. a) corrida #16, b) corrida #17, c) corrida #18, d) corrida #19, e) corrida #20.	88
Figura 68: Briquetas para prueba de compresión. a) corrida #21, b) corrida #22, c) corrida #23, d) corrida #24, e) corrida #25.	89
Figura 69: Briquetas para prueba de compresión. a) corrida #26, b) corrida #27, c) corrida #28, d) corrida #29, e) corrida #30.	89
Figura 70: Briquetas para prueba de compresión. a) corrida #31, b) corrida #32, c) corrida #33, d) corrida #34, e) corrida #35.	89
Figura 71: Briquetas para prueba de compresión. a) corrida #36, b) corrida #37, c) corrida #38, d) corrida #39, e) corrida #40.	89
Figura 72: Briquetas después de su falla a compresión (I).	90
Figura 73: Briquetas después de su falla a compresión (II).	90
Figura 74: Briquetas después de su falla a compresión (III).	90
Figura 75: Briquetas después de su falla a compresión (IV).	91
Figura 76: Briquetas después de su falla a compresión (V).	91
Figura 77: Briquetas después de su falla a compresión (VI).	91

Resumen

En este trabajo se elaboraron biocombustibles sólidos densificados a partir de la mezcla de cascarilla de arroz, fibra de coco, carbón mineral y un aglomerante natural a base de yuca, propios del departamento de Córdoba, fue necesario establecer los límites de los porcentajes de cada componente presente en la mezcla y posteriormente se elaboró un diseño de experimento simplex reticular ampliado, para determinar el número de corridas. Luego se llevó a cabo el proceso de compactación con ayuda de una máquina briqueteadora manual, la cual consta de un gato hidráulico y una matriz cilíndrica de 52 mm de diámetro, para este proceso se trabajó con un tamaño de partícula de 425 μm para la fibra de coco y 600 μm para la cascarilla de arroz y el carbón; las mezclas fueron compactadas con una presión interna en el aceite del gato de 6000 Psi (41,36 MPa) durante un tiempo de sostenimiento de la carga de 15 min. Después de esto se realizaron pruebas de durabilidad mecánica y resistencia a la compresión a las briquetas fabricadas, también se calculó analíticamente el poder calorífico y las emisiones de azufre correspondientes a cada corrida. Posteriormente se realizó el respectivo análisis de resultados.

Finalmente, se encontró que el carbón es el componente que más afecta negativamente la durabilidad de las briquetas, contrario a lo que sucede con la fibra de coco, la cual contribuye a mejorar dicha propiedad. Todas las briquetas presentaron excelente resistencia a la compresión, además ninguna supero en 1 % las emisiones de azufre.

Palabras claves: Biocombustibles, Aglomerante, Durabilidad, Poder calorífico, Briquetas.

Abstract

In this research densified solid biofuels were produced from the mixture of rice husk, coir, coal and natural binder cassava, originally from department of Cordoba, it was necessary to establish the limits of the percentages of each component present in the mixture were established and subsequently developed a simplex lattice design extended experiment, to determine the number of runs. Consecutively the compaction process was carried using a manual briquetting machine, which consists of a hydraulic jack and a cylindrical array of 52 mm diameter, for this process we worked with a particle size of 425 microns for the fiber coconut and 600 microns for rice husk and coal; mixtures were compacted with an internal pressure in the oil Cat 6000 psi (41.36 MPa) for a hold time of 15 min load.

Mechanical tests and compressive strength to briquettes manufactured durability were performed analytically also calorific value and sulfur emissions we calculated for each run. Subsequently the respective results analysis was performed.

Finally, it was found that coal is the component that most adversely affects the durability of briquettes, contrary to what happens with coconut fiber, which helps to improve the property. All briquettes showed excellent compressive strength; besides no sulfur emissions exceeded 1%.

Keywords: Biofuel, Binder, Durability, Heat value, Briquettes.

Introducción

El departamento de Córdoba es reconocido por la fertilidad de sus suelos y su gran variedad de cultivos, entre los cuales se encuentran el arroz y el coco. La producción anual de coco en la región es de 59.164 toneladas, cultivados en un área total de 3.788 hectáreas (MADR, 2006) mientras que 8.158 hectáreas son utilizadas en la siembra de arroz con una producción anual aproximada de 17.751 toneladas (DANE, 2011).

Éstos cultivos generan grandes cantidades de residuos sólidos que se convierten en un problema para los productores, más que todo por los altos volúmenes que dichos residuos representan (dada su baja densidad) y además no se obtiene ningún valor agregado de ellos, lo cual implica sobrecostos de manejo y transporte. Esto conlleva a que los agricultores tomen la decisión de quemarlos a cielo abierto o arrojarlos a fuentes hídricas, ocasionando así gran impacto ambiental en cualquiera de los casos.

También se sabe que, aunque no es su principal producto, el departamento de Córdoba cuenta con una mina de carbón mineral llamada La Guacamaya, de la cual se extraen aproximadamente 400.000 ton/año (Gobernación de Córdoba, 2009). Este carbón se caracteriza por tener un contenido aproximado de azufre de 1,3% (Gobernación de Córdoba, 2009) lo cual impide que se utilice como combustible en estado puro según la resolución 623 de 1998 del ministerio de ambiente colombiano, que establece que dicho porcentaje no debe exceder de 1%.

Es por esto que existe la necesidad de buscar un método de aprovechamiento del potencial energético del carbón y la biomasa producida en la región, conociendo que la cascarilla de arroz, la fibra de coco y el carbón tienen un poder calorífico, 15800, 16300 y 23900 KJ/Kg respectivamente, lo cual les brinda un atractivo como fuente de energía renovable.

Trabajos previos como el de Stolarski et al. (2013) afirman que en diversas zonas de la Unión Europea se han utilizado cada vez más a menudo fuentes renovables en la

generación de energía. Adicionalmente, otras investigaciones han evidenciado el potencial de la biomasa residual de productos agrícolas como fuente renovable de energía. Grover & Mishra (1996) y Demirbas & Sahin (2009) demostraron que los residuos agrícolas como la cascarilla de arroz o la tusa de maíz pueden ser densificados para construir briquetas combustibles y aprovechar su poder calorífico. Francis (2015) menciona también que ésta biomasa puede contribuir a la hora de suplir de la demanda de energía en las zonas rurales, al usarse como combustibles densificados en forma de briquetas. En diversos estudios se han realizado briquetas a partir de la mezcla de dos y hasta tres componentes, como el de Ortega & Berástegui (2015), quienes hicieron mezclas de biomasa-carbón-aglomerante con el fin de evaluar las propiedades mecánicas y energéticas de los productos densificados.

Debido a esto, con la ejecución de este proyecto se busca elaborar biocombustibles sólidos densificados (briquetas) a partir de la mezcla de cuatro componentes: biomasas residuales de los cultivos de coco y arroz, carbón mineral y un agente aglomerante a base de yuca, con el objetivo de que estas alcancen parámetros de durabilidad mecánica y resistencia a la compresión que les permitan resistir condiciones de transporte y manipulación. Adicionalmente, con la presencia de carbón en la mezcla, se pretende que las briquetas adquieran un poder calorífico superior al de la cascarilla de arroz en estado puro, sin perder de vista que durante la combustión deben presentarse emisiones de azufre en niveles inferiores al 1 % como lo reglamenta la norma.

Objetivos

Objetivo general

- Elaborar biocombustibles sólidos densificados a partir de la mezcla de dos biomasas residuales, un aglomerante a base de yuca y carbón mineral, propios del departamento de Córdoba.

Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de las biomasas residuales y el carbón mineral.
- Realizar ensayos de compresión y durabilidad mecánica a las diferentes mezclas, y determinar analíticamente el poder calorífico y las emisiones de azufre a cada briqueta.
- Determinar cuáles son las mezclas favorables de aglomerante, carbón y biomasa.

1. Revisión de la literatura

1.1 Biomasa

La biomasa es aquella materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los residuos y desechos orgánicos, susceptible de ser aprovechada energéticamente. Las plantas transforman la energía radiante del sol en energía química a través de la fotosíntesis, y parte de esta energía queda almacenada en forma de materia orgánica (Garcia, 2012). La principal desventaja de la biomasa es su baja densidad aparente, que suele oscilar entre 40 y 100 kg / m³ para pastos agrícolas y pajas, y de 150 a 250 kg / m³ para los recursos leñosos (Mani et al, 2006). Sin embargo, la biomasa puede ser mecánicamente densificada, aumentando la densidad aparente hasta diez veces, con reportes de densidades de compactación final de 600 a 1200 kg / m³ (Tumurulu et al ,2011).

1.1.1 Tipos de biomasa

- **Biomasa natural:** Se produce de forma espontánea en la naturaleza, sin intervención humana. Por ejemplo, las podas naturales de los bosques.
- **Biomasa residual seca:** Procede de recursos generados en las actividades agrícolas y forestales, así como en las industrias agroalimentaria y maderera (por ejemplo: aserrín). Se denomina así cuando el porcentaje de humedad es menor al 60%.
- **Biomasa residual húmeda:** Procede de vertidos biodegradables formados por aguas residuales urbanas e industriales y también de los residuos ganaderos (el guano, por ejemplo). Se denomina así cuando el porcentaje de humedad supera el 60%.
- **Cultivos energéticos:** Su única finalidad es producir biomasa transformable en combustible. Incluye los cereales y oleaginosas.

1.2 Briquetas

La briqueta es un biocombustible sólido, que se obtiene mediante la compactación o densificación de residuos (de origen lignocelulósico u otros materiales). Se producen bajo la aplicación de grandes presiones y temperaturas elevadas que provocan la auto-aglomeración de sus partículas, o mediante bajas y medianas presiones con ayuda de una sustancia aglomerante para lograr su compactación (Fonseca & Tierra, 2011), suelen ser cilindros de 50 a 130 mm de diámetro y de 5 a 30 mm de longitud. Tienen una densidad elevada entre 1.000 y 1.300 kg/m³. (Fernández, 2004).

Frecuentemente son utilizadas en el sector doméstico e industrial para la generación de calor o producción de energía, ya sea en estufas, chimeneas, cocinas, hornos, calderas como combustibles limpios, gasificadores, etc. La materia prima de la briqueta puede ser biomasa forestal (procedente de aserraderos, fábricas de puertas, fábricas de muebles, fábricas de tableros de partículas, etc.), biomasa residual industrial, biomasa residual urbana, carbón vegetal o simplemente una mezcla de todas ellas (Fonseca & Tierra, 2011).

La forma de las briquetas puede ser variable (ver figura 1) y depende de la maquinaria utilizada en su fabricación. Sin embargo, las briquetas producidas en la actualidad suelen presentar una sección circular; otro tipo de sección es de tipo octogonal, con un hueco circular en el centro, o la sección rectangular, ligeramente redondeada en las cuatro esquinas, lo que le confiere una mayor resistencia en el manejo a los golpes. Este tipo de briquetas se almacenan mucho mejor, pues ocupan menos volumen a igualdad de peso que el tipo cilíndrico o el de prisma octogonal hueco, además de arder más despacio (Paredes, 2012).

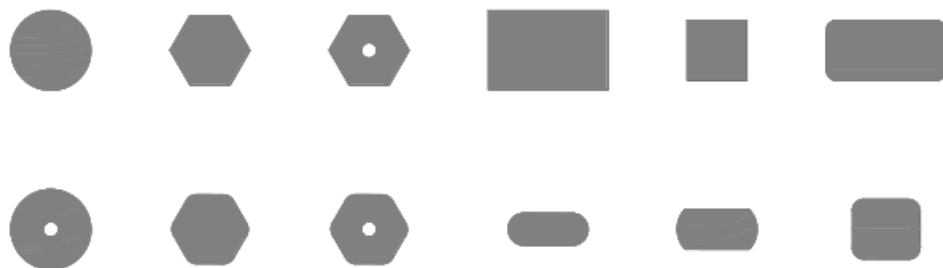


Figura 1: Principales geometrías de las briquetas.

Fuente: Fonseca & Tierra (2011)

1.3 Aglomerante

Los aglomerantes (ligantes, aglutinantes) son sustancias que son capaces de generar fuerzas para unir fragmentos, partículas de una o varias sustancias o materiales y dar cohesión al conjunto por métodos físicos, químicos o térmicos.

El aglomerante para la elaboración de briquetas orgánicas debe cumplir los siguientes aspectos (Calderon, 1997):

- De fácil preparación.
- De fácil aplicación.
- Debe ser de fácil obtención.
- De costo relativamente bajo.
- No ser contaminante durante su combustión.
- Al entrar en contacto con la piel no debe ser nocivo.
- Facilidad de mezclado con la materia prima.
- Debe poseer buenas propiedades de adhesión.
- Presentar resistencia mecánica considerable.

1.3.1 Tipos y propiedades de los aglutinantes.

Los aglutinantes se elaboran a partir de resinas fenólicas, de los almidones provenientes de los vegetales, en algunos casos modificados, y de las arcillas. Los aglomerantes como las resinas presentan mejores propiedades de flexibilidad y

resistencia en las operaciones de corte o desbaste, que los aglomerantes vitrificados, los aglomerantes que provienen de vegetales presentan mejores propiedades de cohesión para compactar biomasa (Calderon, 1997).

Los aglutinantes pueden clasificarse en: combustibles y no combustibles. Son combustibles: las resinas naturales y sintéticas, alquitrán, estiércol animal, manteca, aguas servidas, residuales o barro, gelatina, papel, restos y residuos de pescado, algas y almidones, etc. Entre los no combustibles se tiene: limo, arcilla, barro, cemento, cal, etc. (Calderón, 1997).

También se los puede clasificar en orgánicos e inorgánicos. Son orgánicos: albuminatos, alcoholes, almidones, alquitranes, azúcares, breas, caseína, cola, dextrina, gelatinas, humatos, ligninas-lignosulfonatos, melazas, papel, aserrín, resinas, turba, y entre los inorgánicos: alumbre, arcillas, bentonita, borato de sodio, cal y cal hidratada, cemento, cloruro de magnesio, escayola, silicato de sodio, sílice y yeso (Fonseca & Tierra, 2011)

De los aglutinantes citados, no todos son adecuados para la fabricación de briquetas combustibles por diversos factores. Generalmente entre los más comunes para este fin:

- Almidones de yuca, maíz, arroz.
- Resinas (cola blanca).
- Melaza.
- Parafina.
- Arcillas.
- Alquitrán.

En las briquetas la misión del aglutinante es mantener unidas las partículas durante su secado, almacenamiento y posterior uso sin presentar problemas de desmenuzamiento.

1.3.1.1 Almidones

Los almidones provienen de la familia de los carbohidratos, constituidos de cadenas lineales (Amilasa) y cadenas ramificadas (Amilopectina). Los almidones son extremadamente versátiles, alcanzando una eficiencia incomparable en todas sus aplicaciones.

El almidón es la sustancia con la que las plantas almacenan su alimento en raíces (yuca), tubérculos (papa), frutas y semillas (cereales). Pero, no sólo es una importante reserva para las plantas, también para los seres humanos tiene una alta importancia energética, proporciona gran parte de la energía que consumimos los humanos por vía de los alimentos.

Por lo tanto, el almidón es una sustancia que se obtiene exclusivamente de los vegetales que lo sintetizan a partir del dióxido de carbono que toman del suelo, de la atmósfera y del agua.

En el proceso se absorbe la energía del sol y se almacena en forma de glucosa y uniones entre estas moléculas para formar las largas cadenas del almidón, que pueden llegar a tener hasta 2000 o 3000 unidades de glucosa (Fonseca & Tierra, 2011).

1.3.1.2 Almidón de yuca

El almidón se obtiene de las raíces de mandioca (yuca), de los granos del arroz o del grano de maíz desgerminado (ver figura 2).



Figura 2: Almidón en polvo.

Fuente: (Fonseca & Tierra, 2011)

1.3.1.3 Utilización del almidón de yuca

También conocidos como: fécula de mandioca (yuca-tapioca), son habitualmente utilizados como componentes en los siguientes segmentos industriales:

Sector Alimenticio: En panes de queso, tortas, pudines, cremas, confites, sagú, polvillo ácido para galletas, polvo chocolatado instantáneo, aglutinante para embutidos, espesante para alimentos cocidos, compuesto para grasas vegetales (margarina), etc.

Sector Químico–Farmacéutico: Vehículo o excipiente de pastillas, grageas y jarabes en el sector de medicamentos, jabones, detergentes, pastas dentífricas, colas, gomas, tintas, barnices, explosivos industriales menores, etc.

Sector Industrial Papelero: Como agente aglutinante y precipitador de las fibras de celulosa del papel y cartones, flexibilizante y mejorador de textura y resistencia.

En fabricación de briquetas: Como aglutinante en briquetas de materiales orgánicos, siendo uno de los mejores almidones utilizado principalmente para carbón vegetal o cascarilla de arroz, se usa en este campo por presentar muy buenas propiedades de cohesión para este tipo de material, y además de bajo costo respecto a otros aglutinantes.

1.4 Presión de compactación

La compactación de la materia prima mejora sus características como combustible, ya que reduce el costo de transporte y puede ser fuente fundamental de uso en las zonas rurales en donde no se tiene acceso a otros tipos de combustibles. En la elaboración de briquetas, existen tres categorías para la presión de compactación utilizada (Fonseca & Tierra, 2011) :

- Altas presiones de compactación (>100 MPa).
- Medianas presiones de compactación con dispositivos de calentamiento (5–100 MPa).
- Bajas presiones de compactación con el uso de aglutinantes (<5 MPa).

1.5 Poder calorífico

Es la cantidad de calor liberado cuando se quema por completo una unidad de combustible y los productos de la combustión se enfrían a la temperatura ambiente (Cengel & Boles, 2008).

1.8 Carbón

El carbón, compuesto principalmente por carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre, se origina en transformaciones físicas y químicas de grandes acumulaciones vegetales depositadas en ambientes palustres (pantanos), lagunares o deltaicos (UPME, 2005). El carbón, compuesto principalmente por carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre, se origina en transformaciones físicas y químicas de grandes acumulaciones vegetales depositadas en ambientes palustres (pantanos), lagunares o deltaicos (Gobernación de Córdoba, 2009).

1.8.1 Tipos de carbón

Según las presiones y las temperaturas a los que hayan sido formados distinguimos distintos tipos de carbón. Cuantas más altas son las presiones y las temperaturas de

formación, se obtiene un carbón más compacto, rico en carbono y con mayor poder calorífico (Gobernación de Córdoba, 2009).

Una de las clasificaciones más aceptadas para el carbón corresponde a la American Society for Testing and Materials (ASTMD-388-777), que lo divide en cuatro clases según las propiedades referidas a la composición de los vegetales y las condiciones de presión y temperatura (grado de metamorfismo) a que fueron sometidos durante su formación, se distinguen 4 tipos de carbón (UPME, 2005):

- **Antracita:** o carbón duro, con alto contenido de carbono (86% al 98%), bajo contenido de materia volátil y poder calorífico superior a 32.6 MJ/Kg (14.000 BTU/lb). Usado como combustible en generación de calor o vapor en la industria térmica y siderúrgica, también se usa en la fabricación de goma sintética, colorantes y purificación de agua para consumo humano (filtros).
- **Hulla Bituminosa:** este tipo de carbón posee un menor contenido de carbono y menor poder calorífico que los carbones antracíticos. Por su forma de uso se conocen como carbones coquizables, usados en procesos de obtención del acero, y carbones térmicos, usados en la producción de vapor para generación de energía.
- **Hulla Sub-bituminosa:** con menor poder calorífico que los carbones bituminosos, su composición en carbono está entre 35% y 45%, tiene un elevado contenido de material volátil, algunos con poder coquizable. Es empleado en la generación de energía eléctrica y en procesos industriales.
- **Lignito y Turba:** son carbones con alta humedad y alto contenido de ceniza y de material volátil, lo cual hace que posean un bajo poder calorífico. Es empleado para la generación de calórica (calefacción), energía eléctrica, para algunos procesos industriales en donde se requiere generar vapor y más

recientemente se han fabricado briquetas de turba y lignito para quemarlas en hornos.

1.8.2 Problemas ambientales

La minería del carbón y su combustión causan importantes problemas ambientales y tienen también consecuencias negativas para la salud humana.

Las explotaciones mineras a cielo abierto tienen un gran impacto visual y los líquidos que de ellas se desprenden suelen ser muy contaminantes.

En la actualidad, las compañías mineras están obligadas a dejar el paisaje restituido cuando han terminado su trabajo. Lo normal suele ser que conforme van dejando una zona vacía al extraer el mineral, la rellenen y reforesten para que no queden a la vista los grandes agujeros, las tierras removidas y acumulaciones de derrubios (escombros que se forman cuando se explotan las minas) de ganga (material que acompaña al mineral y no es útil), que hasta ahora eran la herencia típica de toda industria minera. También es muy importante y controlar depurar el agua de lixiviado, es decir, el agua que después de empapar o recorrer las acumulaciones de mineral y derrubios, sale de la zona de la mina y fluye hacia los ríos o los alrededores. Esta agua va cargada de materiales muy tóxicos tales como materiales pesados y productos químicos usados en la minería.

En el proceso de uso del carbón también se producen otros importantes daños ambientales porque al quemarlos se liberan grandes cantidades de gases responsables de efectos tan nocivos como la lluvia ácida, el efecto invernadero, la formación de smog, etc. (Gobernación de Córdoba, 2009).

1.9 Diseño de experimentos

Son modelos estadísticos clásicos cuyo objetivo es averiguar si unos determinados factores influyen en una variable de interés y, si existe influencia de algún factor, cuantificar dicha influencia (Kuehl, 2001).

1.9.1 Diseño simplex reticular

El arreglo formado por una distribución uniforme de coordenadas de diseño en un sistema simplex se conoce como retícula; los diseños de retícula simplex se componen de una malla de coordenadas de diseño (ver figura 3 y 4) construidas de manera que permiten estimar las ecuaciones polinomiales de la superficie de respuesta (Kuehl, 2001).

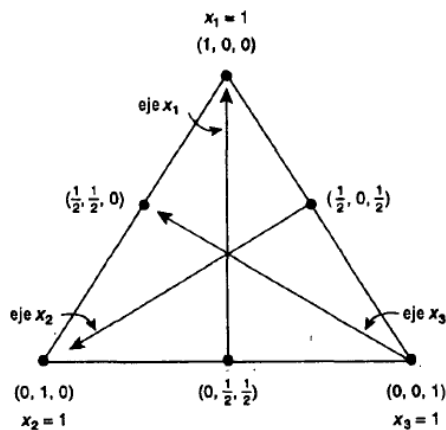


Figura 3: Esquema del sistema triangular de coordenadas para una superficie de respuesta.

Fuente: (Kuehl, 2001)

Estos se usan para estudiar los efectos de los componentes de una mezcla sobre la variable de respuesta (Montgomery, 2004).

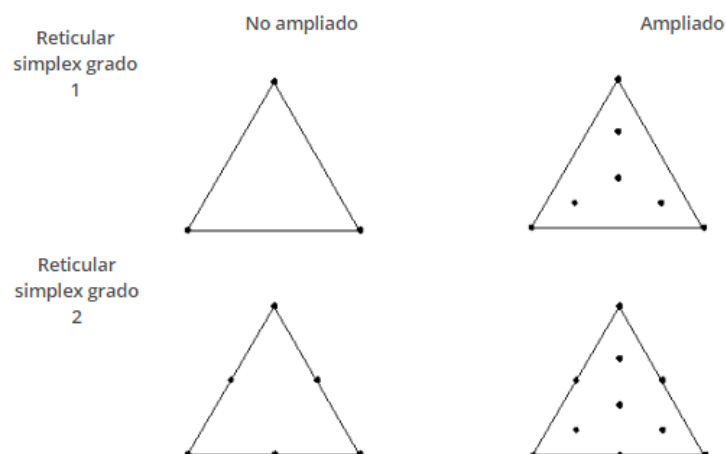


Figura 4: Sistema triangular de coordenadas para un diseño simplex reticular.

Frente: (Montgomery, 2004)

1.9.2 Superficies de respuesta.

La metodología de superficies de respuesta, o MSR, es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas útiles en el modelado y el análisis de problemas en los que una respuesta de interés recibe la influencia de diversas variables y donde el objetivo es optimizar esta respuesta (Montgomery, 2004).

1.10 Estado del arte

En la actualidad, las preocupaciones sobre el desarrollo sostenible y la disminución de los gases de efecto invernadero se han convertido en un tema de vital importancia a nivel mundial. En los últimos años el calentamiento global ha afectado significativamente las condiciones de vida en la tierra y han surgido diversas tecnologías en la búsqueda de nuevas fuentes de energía para suplir la creciente demanda y que al mismo tiempo sean más amigables con el medio ambiente. Según Liu & Wu (2015), una de éstas alternativas es el aprovechamiento del potencial energético presente en las biomásas residuales.

Diversas investigaciones han evidenciado el potencial de la biomasa residual de productos agrícolas o de procesos de maquinado de madera como fuente renovable de energía. Trabajos como el de Grover & Mishra (1996) y Demirbas & Sahin (2009)

demonstraron que los residuos agrícolas como la cascarilla de arroz o la tusa de maíz pueden ser densificados para construir briquetas combustibles y aprovechar su poder calorífico. Francis (2015) menciona también que ésta biomasa puede contribuir a la hora de suplir de la demanda de energía en las zonas rurales, al usarse como combustibles densificados en forma de briquetas.

Chin & Siddiqui (2000) fabricaron briquetas con 4 tipos de biomásas (aserrín, cáscaras de cacahuete, fibras de coco y fibra de palma) y dos aglutinantes (melaza y almidón). Realizaron el proceso de compactación con presiones entre 5-7 MPa con ayuda de una máquina tipo prensa y un punzón. Encontraron que, al aumentar el tiempo de sostenimiento de la carga, se mejoran las propiedades mecánicas de las briquetas como la durabilidad y la resistencia a la compresión.

Kaliyan & Morey (2009) destacan que en los procesos de densificación, hay básicamente dos maneras de lograr la adhesión de los componentes particulados utilizados como materia prima para briquetas: por un lado la presión mecánica se encarga de crear dichos enlaces, ya que al aumentar la presión también se eleva la temperatura de compactación, logrando así que se activen los aglutinantes propios de la biomasa; por otra parte, el uso aglutinantes naturales tales como lignina, proteínas, grasas, almidón, agua o carbohidratos solubles produce puentes sólidos entre las partículas.

Li & Liu (2000) afirman que la presencia de humedad en la biomasa es necesaria, ya que actúa como un agente de unión. Sin embargo, cuando el contenido de humedad es alto, los materiales densificados tienen una durabilidad menor y fácilmente se fracturan. Determinaron que el rango de humedad para producir buena calidad del material densificado (madera dura, madera blanda y corteza en forma de aserrín) es de

5-12% para todos los materiales leñosos estudiados; el contenido óptimo de humedad fue de alrededor de 8%.

Ortega & Berástegui (2015) realizaron procesos de densificación a partir de la mezcla de cascarilla de arroz, carbón mineral y aglomerante natural de yuca, usando un tamaño de partícula de 1,18 mm y una presión de compactación de 7 MPa durante un tiempo de sostenimiento de la carga de 10 min. Encontraron que no fue posible desarrollar briquetas durables y resistentes a partir de esta mezcla.

Conesa et al (2016) realizaron procesos de densificación a diferentes presiones, compactando residuos de muebles (madera y espuma de poliuretano), con el fin de determinar cómo era el comportamiento de la durabilidad a distintas presiones. Aplicaron presiones entre 22 y 88 MPa. Encontraron que la presión óptima para esta mezcla (madera y espuma) es de 44 MPa, consiguiendo durabilidad mayor de 95%. A presiones menores a 44 MPa no se alcanzan estos valores de durabilidad. También concluyeron que el máximo porcentaje de poliuretano en la mezcla no debe exceder el 20%. (MacBain, 1966)

Según MacBain (1966), el Tamaño de las partículas es un factor de gran influencia en el comportamiento de la durabilidad de las briquetas. En general, a partículas más finas, mayor es la durabilidad.

Para Fonseca & Tierra (2011) el mejor aspecto exterior de briquetas se obtiene cuando las fracciones de las partículas de aserrín y otros productos agrícolas, son inferiores a 3 mm, mientras que Turner (1996) asegura que el tamaño de partícula que se recomienda para obtener una buena calidad de las briquetas oscila entre 0,6-0,8 mm.

Al-Shemmeri et al (2015) estudiaron las características y propiedades térmicas y estructurales de diversas biomásas como heno, aserrín y cascarilla de arroz. Realizaron pruebas de combustión en un sistema de baja escala y analizaron el comportamiento

de cada tipo de muestra. Llegaron a la conclusión de que el tamaño de partículas y el contenido de humedad son factores determinantes en la obtención de biocombustibles a base de estas biomásas y recomiendan contenidos de humedad menores al 20% para alcanzar mayor eficiencia en los procesos de combustión, debido a que mientras mayor sea dicho contenido, será necesaria una mayor cantidad de energía para liberar el vapor de agua, con lo cual se reduce significativamente el poder calorífico del biocombustible.

Muazu & Stegemann (2015) estudiaron la durabilidad de briquetas hechas de la mezcla de dos biomásas: cascarilla de arroz y tusa de maíz, y un agente aglomerante a base de almidón de yuca. Realizaron un proceso de caracterización para determinar la densidad, contenido de humedad, tamaño de partículas, absorción de agua y gravedad específica de las biomásas. Luego llevaron a cabo un proceso de densificación por medio de una prensa hidráulica en una matriz cilíndrica. Pudieron confirmar que el alto contenido de tusa de maíz y las altas presiones de compactación, inciden de manera positiva en la resistencia a la compresión y la durabilidad de las briquetas elaboradas bajo estos parámetros.

2. Materiales y métodos

2.1 Caracterización física y química

2.1.1 Obtención de materias primas

Para llevar a cabo este estudio se fabricaron briquetas a partir de dos biomásas diferentes, obtenidas de los residuos de productos típicos del departamento de Córdoba que son la fibra de coco y la cascarilla de arroz. También se utilizó carbón mineral (ver figura 5), extraído en la mina La Guacamaya ubicada en el municipio de Puerto Libertador del departamento de Córdoba, y un agente aglomerante hecho a base de almidón de yuca.



Figura 5: Carbón mineral.

Fuente: *Autores (2016). Registro fotográfico.*

2.1.2 Análisis próximo y elemental

Para conocer con precisión las propiedades y composición químicas de la materia prima utilizada en la elaboración de las briquetas, se tomaron muestras de cada biomasa y de carbón mineral y se realizaron dos tipos de análisis: el primero, un análisis elemental, llevado a cabo en el Laboratorio de Ciencias de la Energía en la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, con el fin de conocer el contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre presentes en los dos tipos de biomasa y el carbón mineral. Seguidamente, se realizó un análisis próximo en el Laboratorio de Carbones de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, para determinar el

porcentaje de humedad residual, cenizas, material volátil, carbono fijo, azufre total y el poder calorífico superior de una muestra de cada biomasa y una de carbón.

2.1.3 Molienda

Los dos tipos de biomasa y el carbón mineral pasaron por un proceso de reducción de tamaño con el objetivo de obtener partículas finas de cada una de ellas, logrando así una mayor superficie de contacto en el proceso de briquetado y, en consecuencia, mayor densidad y durabilidad de las briquetas (Kaliyan & Morey, 2009).

Éste proceso se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana sede Montería, con ayuda de un molino de martillos ubicado en el laboratorio de energías renovables. Dicho molino cuenta con una potencia nominal de 10HP, en la figura 6 se muestra dicho molino.



Figura 6: Molino de martillos.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

Durante el proceso de trituración se utilizó una malla de 2 mm ubicada en el interior del molino, con el fin de obtener partículas de un tamaño definido para facilitar el subsiguiente proceso de tamizado.

2.1.4 Tamizado

Luego de haber reducido el tamaño de partícula de las materias primas, éstas se hicieron pasar por un determinado tamiz para cada una. En este procedimiento se

utilizaron tamices estandarizados por la norma ASTM E-11 como se detalla a continuación:

- Fibra de coco: inicialmente y cumpliendo con el tamaño de partícula recomendado por la bibliografía consultada, se realizó el proceso de tamizado para esta biomasa utilizando un tamiz N°16, el cual tiene aberturas de 1,18 mm de diámetro, como se muestra en la figura 7:



Figura 7: Tamiz ASTM N°16.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

Es de mencionar que en el proceso de briqueteado llevado a cabo posteriormente y con la presión de compactación utilizada, las briquetas elaboradas con éste tamaño de partícula presentaban agrietamiento, lo cual causaba que se despedazaran al momento de su manipulación y desplazamiento de un lugar a otro, tal como lo muestra la figura 8:



Figura 8: Falla estructural en las briquetas debido al inadecuado tamaño de partículas.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

Se decidió entonces utilizar un tamiz con aberturas más pequeñas, con el fin de obtener partículas más finas y así evitar estos agrietamientos. Para esto se utilizó un tamiz diferente, con aberturas de 425 μm de diámetro, el cual se muestra en la figura 9:



Figura 9: Tamiz ASTM N°40.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

- Cascarrilla de arroz y carbón: éstos dos componentes se hicieron pasar por un tamiz N°30 que cuenta con aberturas de 600 μm de diámetro (ver figura 10).



Figura 10: Tamiz ASTM N°30.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

A continuación, en la figura 11 se muestra cada componente luego de pasar por la reducción granulométrica:



a)

b)

c)

Figura 11: Biomosas y carbón tamizados. a) Fibra de coco, b) cascarilla de arroz, c) carbón.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

2.1.5 Determinación de la densidad

Después de realizar el proceso de tamizado, se determinó la densidad de las dos biomosas y el carbón, a través de un proceso de medición de la masa y el volumen de una muestra de cada uno de ellos. Luego la densidad se calculó utilizando la ecuación 1:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Donde:

ρ = densidad

m = masa

V = volumen

Se realizaron tres mediciones de volumen para cada componente, utilizando para ello un beaker de 80 mL de capacidad. Luego de esto, la masa contenida en el beaker fue medida con ayuda de una balanza digital (ver figura 12) que cuenta con una capacidad de 400 g y tiene una resolución de 0,01 g. La balanza fue graduada en cero (0) luego de poner encima el beaker vacío, con el objetivo de que la lectura fuera siempre la masa total de la biomasa en cuestión. Éste proceso se realizó tres veces para lograr mayor precisión, para masas que ocupaban volúmenes de 80, 60 y 40 mL para cada

factor. La densidad total obtenida fue el promedio de los tres valores calculados para cada componente.



Figura 12: Medición de la masa para el cálculo de la densidad.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

2.1.6 Aglomerante utilizado

Para lograr la unión entre las partículas de los componentes de las briquetas, se utilizó el bioaglomerante natural a base de yuca (ver figura 13). Varias fueron las consideraciones tenidas en cuenta al momento de elegir este agente aglomerante, entre las que se encuentran: la amplia disponibilidad comercial, el bajo costo de producción, la fácil obtención de la materia prima dado que es un cultivo propio del departamento de Córdoba, es considerado un buen agente de unión debido a sus propiedades químicas y estructurales (Satin, 1998) y ha arrojado buenos resultados en investigaciones previas en las cuales ha sido utilizado para la fabricación de briquetas a base de otras biomasas como residuos de cosecha de sorgo (Bamgboye & Boluwafi, 2009) y tusa de maíz (Oladeji & Enweremadu, 2012).



Figura 13: Bioaglomerante natural de yuca.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

2.1.7 Contenido de humedad en los factores

Se utilizó un medidor de humedad digital (ver figura 14) con resolución 0.1 y se realizaron tres mediciones a cada componente, luego de haber pasado por el proceso de tamizado. Se sabe por experiencia que la humedad es un factor determinante en la combustión de biomasa (Al-Shemmeri, Yedla, & Wardle, 2015) y es por eso que debe verificarse que se encuentre en los niveles deseados.



Figura 14: Medidor de humedad.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

2.2 Realización ensayos de compresión y durabilidad mecánica, y determinación analítica del poder calorífico y las emisiones de azufre a cada briqueta

2.2.1 Diseño del experimento

Fue necesario realizar un diseño experimental con el fin de determinar el número de corridas y los porcentajes en masa de cada componente en cada una de las réplicas.

Dicho diseño se hizo con la ayuda del software Desing Expert versión 10 usando un modelo simplex reticular ampliado grado 2 para 4 factores. En la tabla 1 se muestran cada uno de los factores y las variables de respuesta.

Tabla 1: Factores y variables de respuesta.

Fuente: Autores (2016).

FACTOR	VARIABLES DE RESPUESTA
Fibra de coco	Durabilidad
Cascarilla de arroz	Resistencia a la compresión
Carbón	Poder calorífico
Bioaglomerante natural de yuca	Emisiones de azufre

En esta fase, se definieron los rangos de porcentaje en masa de cada factor (ver tabla 2) presente en la mezcla. Dichos rangos quedaron definidos de la siguiente manera:

Tabla 2: Rangos de trabajo para el contenido de cada factor.

Fuente: Autores (2016).

FACTOR	RANGO DE TRABAJO (%)
Fibra de coco	40-70
Cascarilla de arroz	0-20
Carbón mineral	0-25
Aglomerante	5-15

Los rangos de trabajo de la cascarilla de arroz y el carbón mineral se mantuvieron en niveles relativamente bajos en comparación con el contenido de fibra de coco presente en la mezcla, debido a que investigaciones previas, como Ortega & Berastegui (2015)

han arrojado resultados que indican que, a mayor contenido de carbón y cascarilla de arroz, menor serán la resistencia a la compresión y la durabilidad de las briquetas.

En cuanto a la fibra de coco, se trabajó con este rango debido a su alto poder calorífico, mayor que el de la cascarilla de arroz, y con el objetivo de estudiar las propiedades que les confiere a las briquetas, utilizándola como componente principal en su elaboración.

Por último, el contenido de aglomerante se definió con base en los resultados previamente obtenidos en diversas investigaciones en las que se utilizó el mismo tipo de sustancia, como la de Rukayya & Stegemann (2015) en donde el aglomerante se utilizó en intervalos de 4-6%; o la de Ortega y Berástegui (2015) donde el rango fue de 5-20%.

2.2.2 Máquina briqueteadora

Para el proceso de briqueteado se empleó una máquina briqueteadora de accionamiento manual tipo prensa (ver figura 15), la cual fue diseñada y construida por estudiantes del programa de ingeniería mecánica de la Universidad de Córdoba.



Figura 15: Máquina briqueteadora manual.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

Como se muestra en la figura anterior, la maquina consta de una plataforma sobre la cual va montado un gato hidráulico encargado de ejercer la carga de compactación

sobre la mezcla. Cuenta también con dos resortes y dos barras guía que mantienen la plataforma estable durante los movimientos verticales de la misma.

La mezcla de los componentes se vierte en el interior de una matriz cilíndrica de 50,8 mm de diámetro.

2.2.3 Elaboración de las briquetas

Cada briqueta se fabricó para una masa de 50 g de mezcla y se hicieron 4 por cada corrida determinada en la fase del diseño experimental, de las cuales 2 fueron utilizadas en la prueba de compresión y 2 en la prueba de durabilidad.

Inicialmente, se midió la masa correspondiente de cada componente en cada corrida, acorde con el diseño experimental. La masa fue medida en una balanza electrónica con resolución de 0,01 g. Luego, los componentes fueron mezclados en un recipiente de manera manual hasta alcanzar una mezcla homogénea (ver figura 16).



Figura 16: Preparación de la mezcla.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

Después de esto, cada mezcla fue vertida en la matriz cilíndrica de la máquina y fue compactada por medio de un punzón que soporta y transmite la carga ejercida por el gato (ver figura 17).



Figura 17: Máquina briqueteadora y sus componentes.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

Se trabajó con una presión de compactación de unos 6000 psi (41,36 MPa) en el aceite del gato hidráulico, al cual le fue adaptado un manómetro de glicerina (ver figura 18) con el objetivo de medir dicha presión.



Figura 18: Medición de la presión interna en el aceite del gato hidráulico.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

El tiempo de sostenimiento de la carga para cada briqueta fue de 15 min y luego de retirar la carga se esperó un tiempo aproximado de 3 min con el fin de evitar una expansión volumétrica acelerada de las briquetas, en la figura 19 se muestra la briqueta final obtenida al finalizar todo este proceso.

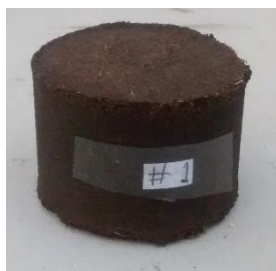


Figura 19: Briqueta terminada.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

2.2.4 Pruebas experimentales

2.2.4.1 Prueba durabilidad mecánica

Esta prueba se realizó siguiendo los parámetros establecidos en la norma CEN/TS 15210, empleando para ello una cámara rotativa en forma de prisma rectangular, la cual es accionada por medio de un motor eléctrico que cuenta con un variador de frecuencia que permite controlar la velocidad de rotación. Éste equipo se encuentra en el laboratorio de energías renovables de la Universidad Pontificia Bolivariana sede Montería.

El ensayo consiste en introducir dos briquetas por cada corrida en la cámara rotativa (ver figura 20) y hacer girar ésta a 21 rpm durante 5 min, de tal manera que las briquetas sufran golpes aleatorios entre ellas y las paredes de la cámara para simular condiciones de transporte en una situación real. La masa de ambas briquetas fue medida antes de la prueba.



Figura 20: Máquina para ensayos de durabilidad mecánica.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

Después de realizar éste procedimiento, el contenido de la cámara rotativa se hace pasar por un tamiz con aberturas de un tamaño aproximado a 2/3 del diámetro de las briquetas. Luego, la masa retenida en dicho tamiz (masa final) es llevada nuevamente a la balanza digital. La durabilidad se calcula entonces como la relación entre la masa final y la inicial (ver figura 21).



Figura 21: Briquetas antes y después de la prueba de durabilidad.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

Según la norma, el grado más alto de durabilidad (DU) corresponde a $DU \geq 95\%$, el valor medio en un rango de $90\% < DU < 95\%$, y se considera relativamente baja durabilidad mecánica a un porcentaje inferior a 90 %.

2.2.4.2 Prueba de resistencia a la compresión

Para realizar esta prueba, se acudió al laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana que cuenta con una máquina de compresión inconfiada con una capacidad máxima de carga de 150 Kgf. Esta prueba se realizó según la NTC 2060–Briquetas combustibles para uso doméstico (ver tabla 3), la cual indica en su numeral 4.2.1 el criterio de aceptación para briquetas según su resistencia al aplastamiento en función de su masa. Esta prueba se realizó en una máquina de compresión inconfiada (ver figura 22).

Tabla 3: Requisitos de resistencia a la compresión para briquetas en función de su masa.

Fuente: Autores (2016).

Masa de cada briketa (g)	Carga, mínimo en N (kgf)
60 ó más	784,31 (80)
40	588,23 (60)
30	490,19 (50)
20	392,15 (40)

Sabiendo que las briquetas se elaboraron con 50 g de mezcla, según la tabla anterior, la carga mínima que deben soportar para considerarlas aceptables es de 70 kgf.



Figura 22: Máquina de compresión inconfiada.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

En el momento de realizar la prueba, se evidenció que la carga máxima ejercida por la máquina no fue lo suficientemente alta para encontrar la resistencia máxima a la cual fallan las probetas. Es por ello que se decidió realizar nuevamente la prueba, pero en una máquina para ensayos a compresión marca PINZUAR con capacidad de 1200 KN y resolución de 0.01 KN (ver figura 23).



Figura 23: Máquina para ensayos a compresión PINZUAR.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

2.2.5 Calculo analítico del poder calorífico y emisiones de azufre de las briquetas

Ambos cálculos se hicieron de forma analítica, dado que para combustibles líquidos y sólidos es muy frecuente utilizar ecuaciones empíricas o ecuaciones que obtienen el poder calorífico inferior o superior en función de las fracciones másicas de los componentes elementales (Miranda & Oliver, 1996) y (Molina & Molina, 1984).

Para el poder calorífico de las briquetas se tuvo en cuenta el porcentaje en masa de cada factor y el poder calorífico de cada uno de los factores. Para el cálculo de las emisiones de azufre también se tuvo en cuenta el porcentaje en masa de cada componente y las emisiones de azufre de cada factor. Tanto el poder calorífico como las emisiones de azufre de cada componente se obtuvieron a partir de los análisis próximo y elemental.

Estos cálculos se hicieron a partir de las expresiones matemáticas 2 y 3:

$$PC = (16,3117 * \%FC) + (23,9275 * \%C)(15,8135 * \%CA) + (10,3413 * \%A) \quad (2)$$

$$\%S = (0,12 * \%FC) + (1,55 * \%C)(0,10 * \%CA) + (0 * \%A) \quad (3)$$

Donde:

PC= poder calorífico

%S= porcentaje de emisiones de azufre.

%FC= porcentaje en masa de la fibra de coco

%C= porcentaje en masa del carbón

%CA= porcentaje en masa de la cascarilla de arroz

%A =porcentaje en masa del aglomerante

2.3 Determinación de las mezclas favorables

Luego de cumplir con toda la fase experimental, los datos obtenidos para compresión, durabilidad, poder calorífico y emisiones de azufre fueron consignados y procesados en el software de análisis estadístico Desing Expert versión 10. Para el procesamiento de los datos y con el objetivo de generar modelos de predicción, el software selecciona el modelo que más se ajusta a cada variable de respuesta, basándose en la significancia (valor $P < 0,05$). Luego de haber seleccionado el mejor modelo para cada variable, el software generó las respectivas superficies de respuesta y posteriormente se ejecutó una optimización multivariable, maximizando y minimizando ciertos factores y ciertas variables de salida. Para la obtención de las mezclas favorables, se cumplió con los siguientes criterios:

- Maximizar el contenido de biomasa en la mezcla y mantener el contenido de aglomerante en el rango de trabajo.
- Con el objetivo de aumentar el poder calorífico de las briquetas en comparación con el de la cascarilla de arroz en estado puro, se decidió maximizar el contenido de carbón en las mezclas, sin olvidar que a mayor proporción de este aumentan las emisiones de azufre, es por ello que se minimizó las emisiones de azufre.
- Por último, se fijó deseabilidad de la durabilidad y la resistencia en rangos de valores que garantizaron briquetas de calidad según la normatividad.

Con las superficies de respuesta establecidas, se pudo observar la interacción de los cuatro factores y las variables de respuesta, y de esta manera se determinó cuáles son las mezclas favorables, dependiendo de los resultados que se desee obtener para una variable determinada, sin perder de vista los cambios que esto trae consigo sobre las demás.

3. Resultados y discusiones

3.1 Resultados experimentales de la caracterización fisicoquímica

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en la fase de caracterización de las materias primas utilizadas en la fabricación de las briquetas.

3.1.1 Análisis próximo y elemental

En la tabla 4, se presentan los resultados los análisis próximo y elemental realizados a las dos biomásas y el carbón, donde las propiedades más relevantes en lo concerniente a la investigación fueron el poder calorífico y el contenido de azufre.

Tabla 4: Resultados de los análisis próximo y elemental para las materias primas.

Fuente: Autores (2016).

Muestra	Humedad residual (%)	Cenizas (%)	Materia volátil (%)	Carbono fijo (%)	Azufre total (%)	Poder calorífico superior (cal/g)	%C	%H	%N
Fibra de coco	13,94	5,10	57,24	23,72	0,12	3896	39,40	4,27	0,70
Cascarilla de arroz	10,18	8,33	64,67	16,82	0,10	3777	39,27	4,91	0,59
Carbón mineral	12,52	3,96	43,54	39,98	1,55	5715	60,29	4,61	1,47

3.1.2 Densidad

Los resultados de la densidad para los diversos componentes se muestran a continuación en la tabla 5:

Tabla 5: Densidad promedio de las biomásas y el carbón.

Fuente: Autores (2016).

Componente	Masa (g)	Volumen (mL)	Densidad (g/mL)	Densidad (Kg/m ³)
Fibra de coco	25,228	80	0,32	315,35
	21,063	60	0,35	351,05
	14,178	40	0,35	354,45
	Promedio		0,34	340,28
Cascarilla de arroz	37,63	80	0,47	470,38
	31,95	60	0,53	532,5
	21,93	40	0,55	548,25
	Promedio		0,52	517,04
Carbón	27,83	80	0,35	347,8
	23,17	60	0,39	386,1
	12,5	40	0,31	312,5
	Promedio		0,35	348,8

3.1.3 Contenido de humedad

La humedad de los diversos componentes, se muestran en la tabla 6:

Tabla 6: Humedad promedio de las biomásas y el carbón.

Fuente: Autores (2016).

Humedad	Fibra de coco	Cascarilla de arroz	Carbón
Medición 1 (%)	14,6	7,3	8,8
Medición 2 (%)	14,3	7,1	8,6
Medición 3 (%)	15,2	6,9	8,4
Promedio (%)	14,7	7,1	8,6

3.2 Resultados obtenidos en las pruebas experimentales y analíticas

3.2.1 Diseño experimental

Con base en los rangos de trabajo establecidos para los porcentajes de cada componente en cada briqueta, se realizó una batería de ensayos con la ayuda del software Design Expert versión 10, teniendo en cuenta estos rangos, se obtuvo una batería de ensayo con un total de 40 corridas (ver tabla 7).

Tabla 7: Batería de ensayos arrojada por el diseño experimental.

Fuente: Autores (2016). Design Expert versión 10.

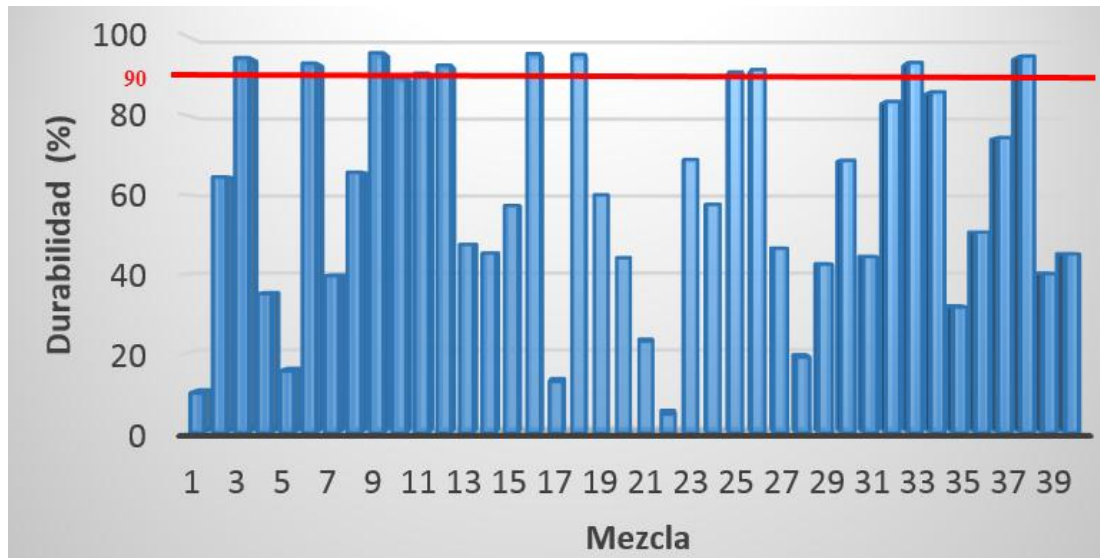
Corrida	Composición en masa de la briqueta			
	Fibra de coco (%)	Carbón (%)	Arroz (%)	Aglomerante (%)
1	70,0	25,0	0,0	5,0
2	70,0	5,0	20,0	5,0
3	70,0	0,0	20,0	10,0
4	50,0	25,0	20,0	5,0
5	40,0	25,0	20,0	15,0
6	70,0	15,0	0,0	15,0
7	70,0	0,0	15,0	15,0
8	60,0	25,0	0,0	15,0
9	65,0	0,0	20,0	15,0
10	66,4	19,2	6,3	8,1
11	66,4	9,1	16,4	8,1
12	66,4	6,6	16,4	10,6
13	56,4	19,1	16,4	8,1
14	51,4	19,1	16,4	13,1
15	66,4	14,1	6,4	13,1
16	66,4	6,6	13,9	13,1
17	61,4	19,1	6,4	13,1
18	63,9	6,6	16,4	13,1
19	70,0	15,0	10,0	5,0
20	60,0	25,0	10,0	5,0
21	70,0	20,0	0,0	10,0
22	65,0	25,0	0,0	10,0
23	70,0	2,5	20,0	7,5
24	60,0	15,0	20,0	5,0
25	70,0	0,0	17,5	12,5
26	67,5	0,0	20,0	12,5
27	45,0	25,0	20,0	10,0
28	50,0	25,0	10,0	15,0
29	52,5	12,5	20,0	15,0

30	70,0	7,5	7,5	15,0
31	65,0	20,0	0,0	15,0
32	67,5	0,0	17,5	15,0
33	70,0	9,0	11,0	10,0
34	63,3	18,4	13,3	5,0
35	55,0	25,0	10,0	10,0
36	66,7	21,7	0,0	11,6
37	59,0	11,0	20,0	10,0
38	68,3	0,0	18,4	13,3
39	61,0	13,0	11,0	15,0
40	62,8	13,3	12,8	11,1

3.2.2 Resultados experimentales

3.2.2.1 Durabilidad mecánica

Los resultados de la prueba de durabilidad mecánica para cada corrida se muestran en la gráfica 1. Solo 11 de los 40 (27,5%) diferentes tipos de briquetas que se elaboraron obtuvieron un porcentaje de durabilidad mayor al 90%, el cual corresponde al valor mínimo que debe tener una briketa para ser considerada aceptable, siendo 95.7% el valor de durabilidad más alto correspondiente a la mezcla # 9. Las briquetas #1, #5, #17 y #22 fueron las que presentaron menor durabilidad, debido a que estas contienen altos porcentajes de carbón. De acuerdo a lo comprobado experimentalmente, las mezclas que tenían un alto contenido de carbón, presentaban mayor oposición al momento de compactarlas y, por ende, resultaban briquetas de mayor altura, lo cual se traduce en un mayor espaciamiento entre las partículas, en comparación con aquellas briquetas con un menor contenido de éste factor. Así pues, se puede afirmar que la causa principal de que el carbón sea un factor detractor sobre la durabilidad mecánica en las briquetas, se debe a que mientras mayor sea el espacio entre las partículas de éstas, menos resistirán a los golpes aleatorios que sufren en la prueba de durabilidad y presentarán fractura, quiebre y pérdida de masa en mayor medida que aquellos especímenes fabricados con menor proporción en masa de carbón.



Gráfica 1: Resultados de la prueba de durabilidad mecánica para cada corrida.

Fuente: Autores (2016). Microsoft® Excel 2013.

3.2.2.2 Modelo de regresión

El modelo de regresión que predice la durabilidad mecánica de las briquetas a base fibra de coco, cascarilla de arroz, carbón y aglomerante en función del porcentaje en masa de cada uno de estos componentes, es el mostrado en la ecuación 4:

$$\begin{aligned}
 \text{Durabilidad} = & -0,93274 * FC + 109,74851 * C - 81,06020 * CA - \\
 & 173,17197 * A - 2,00991 * FC * C + 1,20263 * FC * CA + 2,87576 * FC * A - \\
 & 0,66058 * C * CA + 2,68944 * C * A + 3,83746 * CA * A + 0,013730 * FC * C * \\
 & CA - 0,032912 * FC * C * A - 0,025149 * FC * CA * A - 0,050767 * C * CA * \\
 & A + 0,012156 * FC * C * (FC - C) - 3,70908E - 003 * FC * CA * (FC - CA) - \\
 & 0,010328 * FC * A * (FC - A) - 3,36334E - 003 * C * CA * (C - CA) - \\
 & 0,026215 * C * A * (C - A) + 0,043743 * CA * A * (CA - A) \quad (4)
 \end{aligned}$$

Donde:

FC= porcentaje en masa de la fibra de coco

C= porcentaje en masa del carbón

CA= porcentaje en masa de la cascarilla de arroz

A =porcentaje en masa del aglomerante

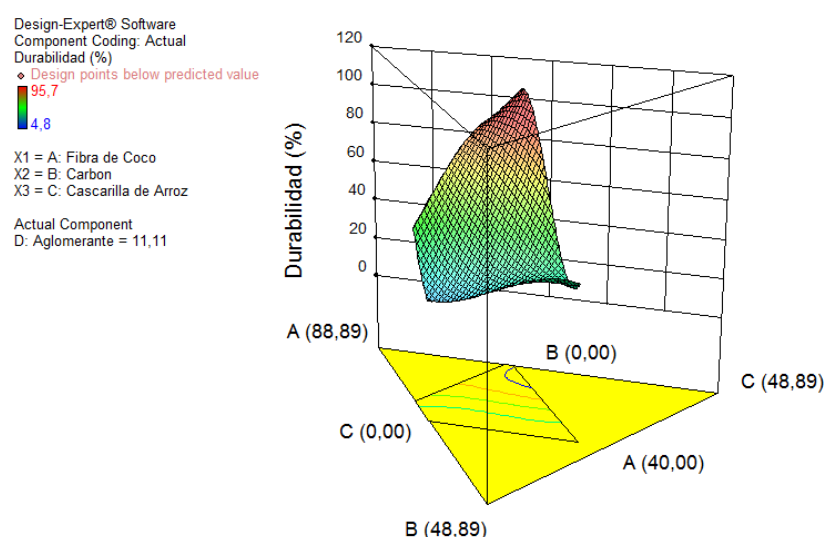
De la ecuación anterior, se omite la parte resaltada debido a que los coeficientes que acompañan a los factores se hacen cada vez más pequeños y así se hacen cada vez

menos significativos en el resultado final, como se pudo comprobar a través de cálculos manuales.

En el anexo E1, se muestra la gráfica de los valores de respuesta predichos frente a los valores de respuesta actuales de durabilidad, con la cual se pudo concluir que el modelo ofrece una buena aproximación y predicción de los valores de durabilidad mecánica para este tipo de briquetas.

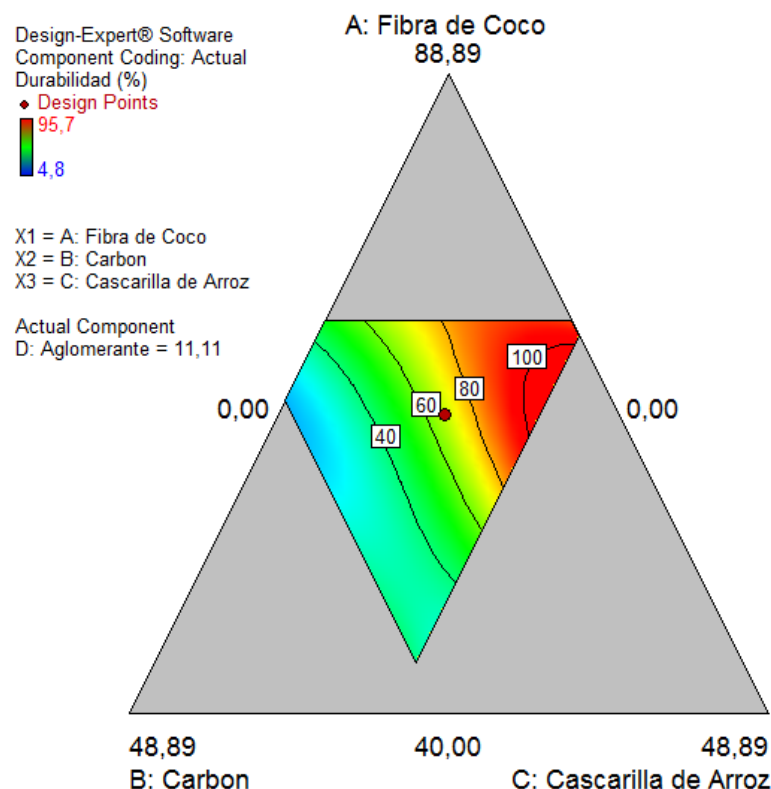
3.2.2.3 Superficies de respuesta y gráfico de contorno

A través de las gráficas 2 y 3 se puede afirmar que para obtener una durabilidad mayor al 90%, es necesario que en la mezcla haya presente altas cantidades de fibra de coco y cascarilla de arroz, consiguiéndose buenos resultados con valores de estas dos biomazas comprendidos en los rangos de 60-70% y 14-20% respectivamente. También se observa que el carbón es el elemento de la mezcla que más disminuye la durabilidad, pues a medida que aumenta este la durabilidad se reduce, obteniéndose valores aceptables de ésta con porcentajes de carbón menores al 9%.



Gráfica 2: Superficie de respuesta para la durabilidad mecánica.

Fuente: Autores (2016). Design Expert versión 10.



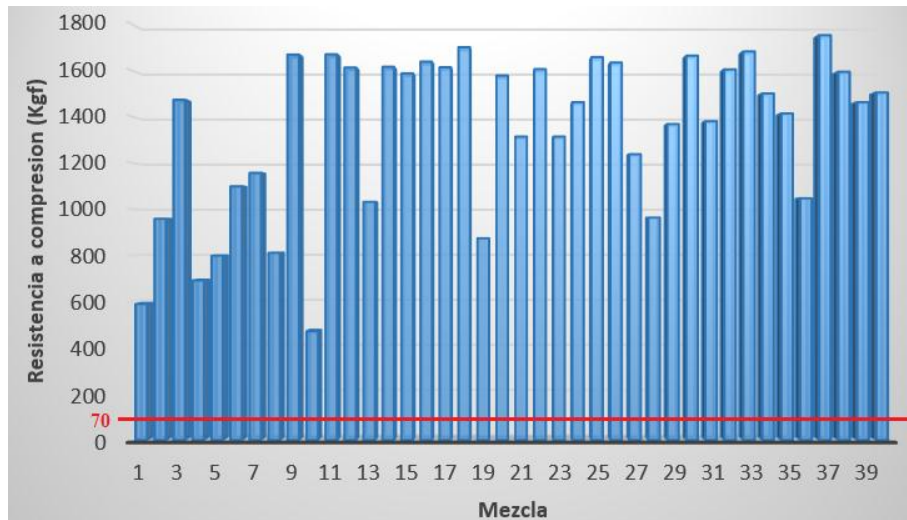
Gráfica 3: Gráfico de contorno para la durabilidad mecánica.

Fuente: Autores (2016). Design Expert versión 10.

3.2.3.1 Resistencia a la compresión

Los resultados obtenidos en la prueba de compresión para cada corrida se muestran en la gráfica 4. Mediante esta grafica se puede afirmar que el 100 % de las mezclas superó la carga mínima de 70 Kgf necesaria para ser aceptadas, tal como lo dice la norma. La mezcla que presentó mayor resistencia a la compresión corresponde a la # 37, la cual soportó una carga de 1752,29 Kgf.

Es necesario resaltar que todas las corridas superaron ampliamente ésta prueba, debido a que, por la elevada presión de compactación manejada en el proceso, la relación final de altura-diámetro era inferior a 2, lo cual aumenta considerablemente la carga necesaria para lograr que éstas fallen.



Gráfica 4: Resultados de la prueba de compresión para cada corrida.

Fuente: Autores (2016). Microsoft® Excel 2013.

3.2.3.2 Modelo de regresión

El modelo de regresión que predice la resistencia a la compresión de las briquetas a base fibra de coco, cascarilla de arroz, carbón y aglomerante en función del porcentaje en masa de cada uno de estos componentes, es el mostrado en la expresión 5:

$$\begin{aligned} Carga = & -0,25886 * FC - 0,96681 * C - 0,88377 * CA - 7,95276 * A + \\ & 0,021513 * FC * C + 0,20868 * FC * CA + 0,11469 * FC * A + 0,013065 * C * \\ & CA + 0,090684 * C * A + 0,10216 * CA * A \quad (5) \end{aligned}$$

Donde:

FC= porcentaje en masa de la fibra de coco

C= porcentaje en masa del carbón

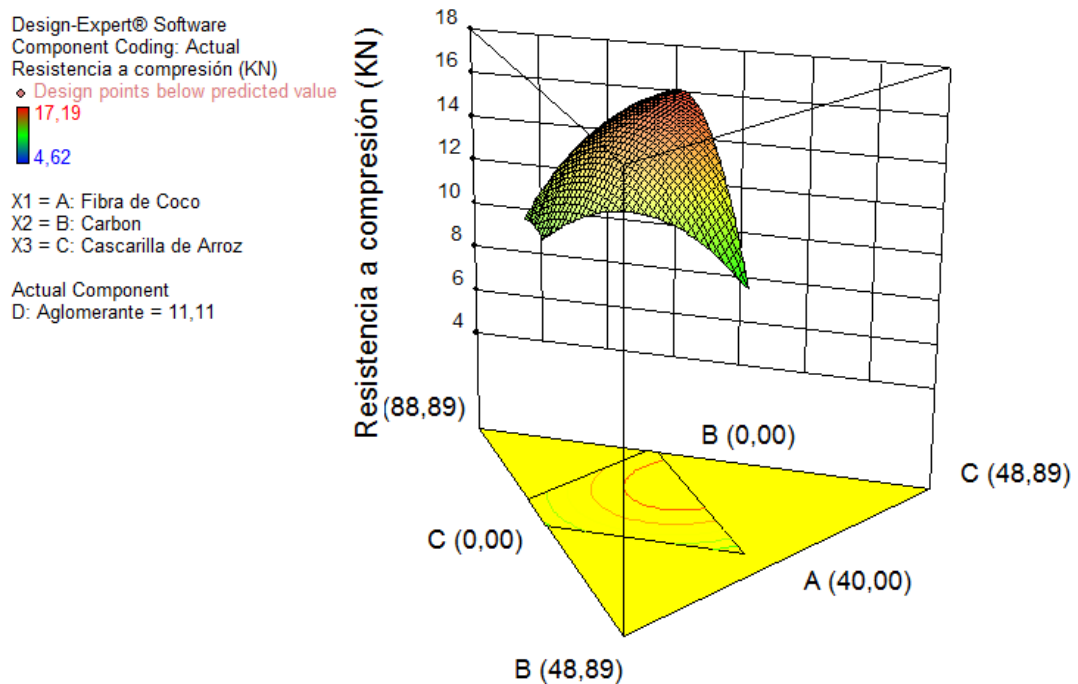
CA= porcentaje en masa de la cascarilla de arroz

A =porcentaje en masa del aglomerante

En el anexo E2, se muestra la gráfica de los valores de respuesta predichos frente a los valores de respuesta actuales para la resistencia a la compresión, mediante la cual se pudo concluir que el modelo ofrece una buena aproximación y predicción de los valores de esta variable de respuesta para briquetas de este tipo de mezclas.

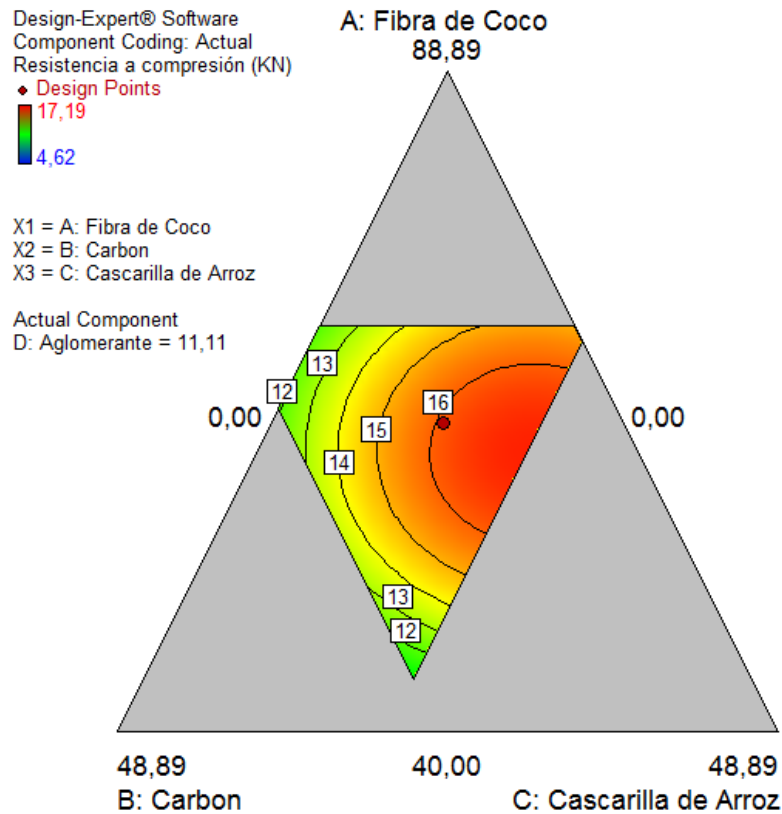
3.2.3.3 Superficie de respuesta y gráfico de contorno

Todas las briquetas superaron ampliamente la prueba de resistencia al a compresión, pero al analizar las gráficas 5 y 6 se puede afirmar que los valores más altos de resistencia a la compresión se alcanzan cuando se manejan porcentajes de fibra de coco entre 60-70%, cascarilla de arroz en un rango de 12-20% y carbón en proporciones inferiores al 10%, aproximadamente.



Gráfica 5: Superficie de respuesta para la resistencia a la compresión.

Fuente: Autores (2016). Design Expert versión 10.



Gráfica 6: Gráfico de contorno para la resistencia a la compresión.

Fuente: Autores (2016). Design Expert versión 10.

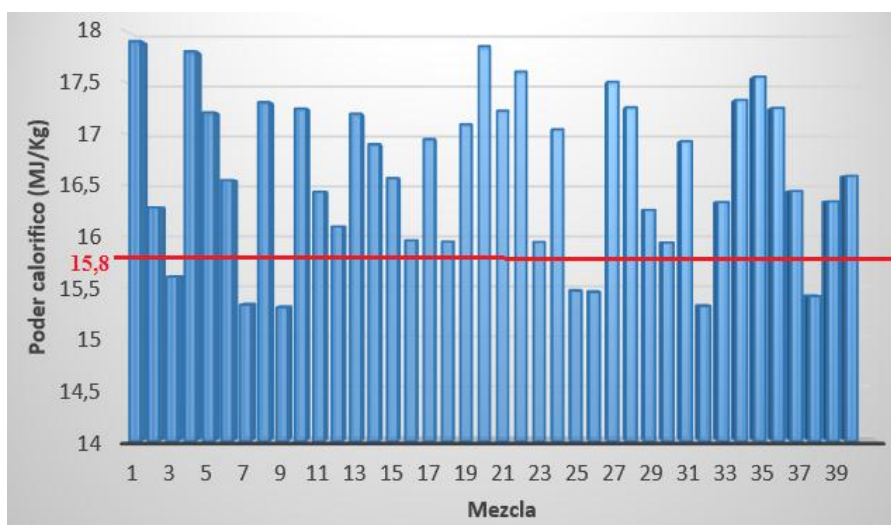
3.2.3 Resultados analíticos del poder calorífico y emisiones de azufre de las briquetas

3.2.3.1 Poder calorífico

Los resultados obtenidos en el cálculo del poder calorífico para cada corrida se muestran en la gráfica 7; en esta se puede observar, que el valor mínimo corresponde a 15,307 MJ/Kg y el máximo es de 17,905 MJ/Kg para las mezclas # 9 y # 1 respectivamente. 33 de las 40 briquetas (82,5 %) presentaron poder calorífico superior al valor de la cascarilla de arroz (15,8 MJ/Kg), como se buscaba inicialmente.

Además, las briquetas #1, #4 y # 20 son las que tienen el valor de poder calorífico más alto, debido al elevado porcentaje de carbón presente en estas, correspondiente al 25 %, a diferencia de las 7 briquetas con valores de poder calorífico por debajo de la línea

roja, en las cuales no hay presencia de carbón. Además, el valor promedio del poder calorífico para las 40 briquetas corresponde a 16,62 MJ/Kg.

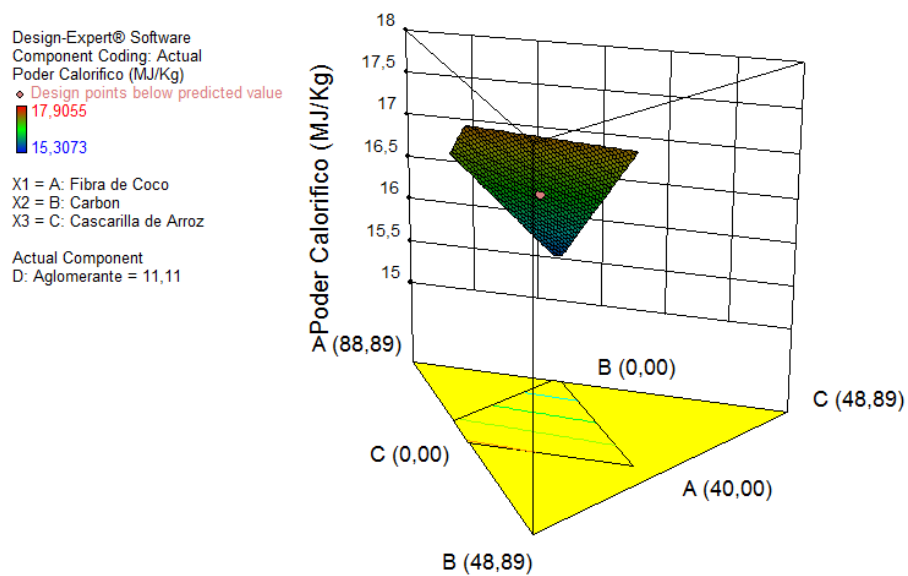


Gráfica 7: Resultados del cálculo del poder calorífico para cada corrida.

Fuente: Autores (2016). Microsoft® Excel 2013.

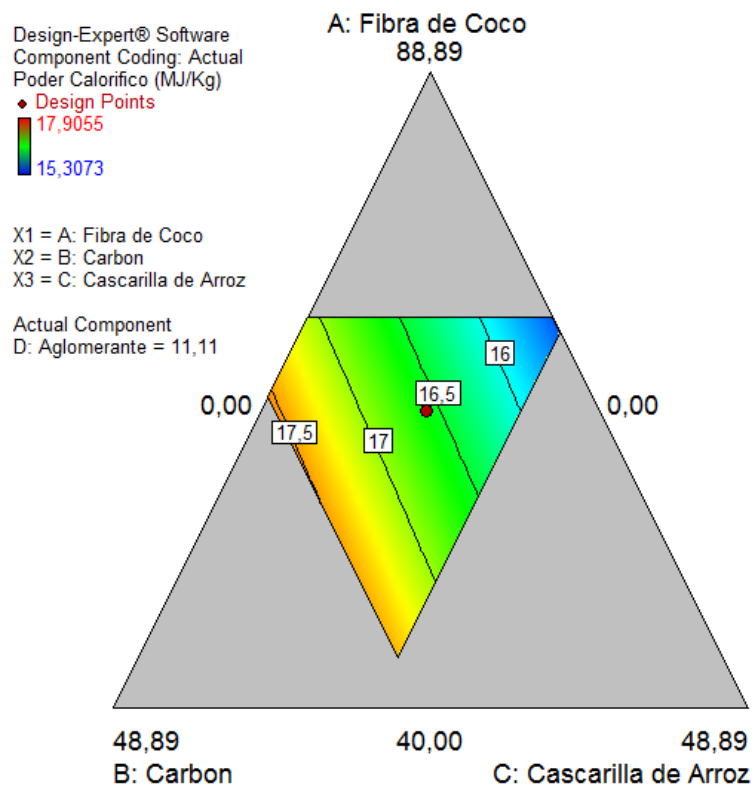
3.2.3.2 Superficie de respuesta y gráfico de contorno

Se puede notar con claridad en las gráficas 8 y 9, que el poder calorífico es directamente proporcional a la cantidad de carbón presente en la mezcla, es decir, a medida que aumenta el carbón también lo hace el poder calorífico y viceversa. Es un resultado esperado, ya que el poder calorífico del carbón es mayor que el de las biomasas y del aglomerante.



Gráfica 8: Superficie de respuesta para el poder calorífico.

Fuente: Autores (2016). Design Expert versión 10.



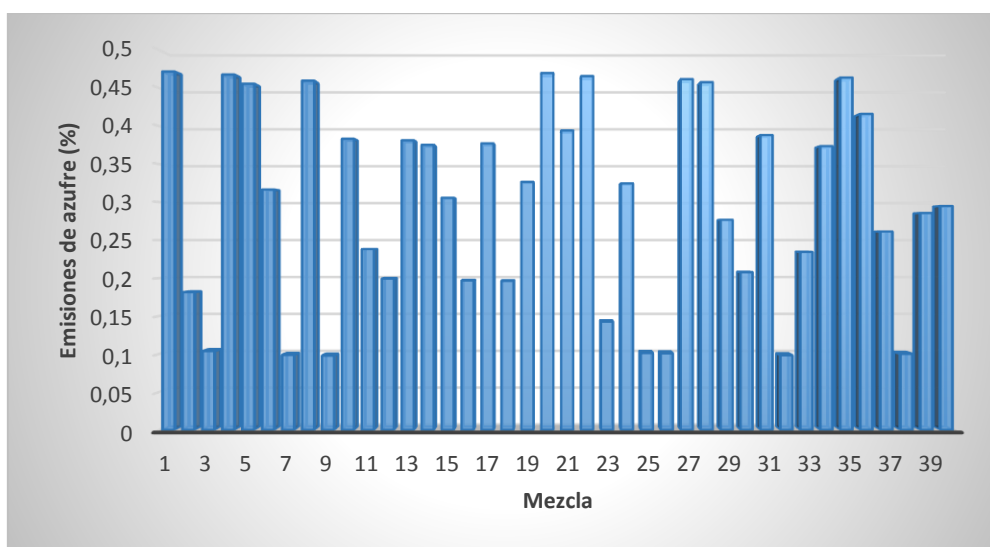
Gráfica 9: Gráfico de contorno para el poder calorífico.

Fuente: Autores (2016). Design Expert versión 10.

3.2.3.1 Emisiones de azufre.

Como se puede observar en la gráfica 10, ninguna de las briquetas supero el 1% en las emisiones de azufre, cumpliendo con esto uno de los requerimientos necesarios para poder darle uso al carbón y a sus mezclas como combustible. La mezcla que mayores emisiones de azufre presenta corresponde a la # 1, con un valor de 0.4515 %.

Además, las mezclas con los valores de emisiones más altos, corresponden a las mezclas con altos porcentajes de carbón, como era de esperarse. Además, el valor promedio de esta variable de respuesta corresponde a 0,298%.

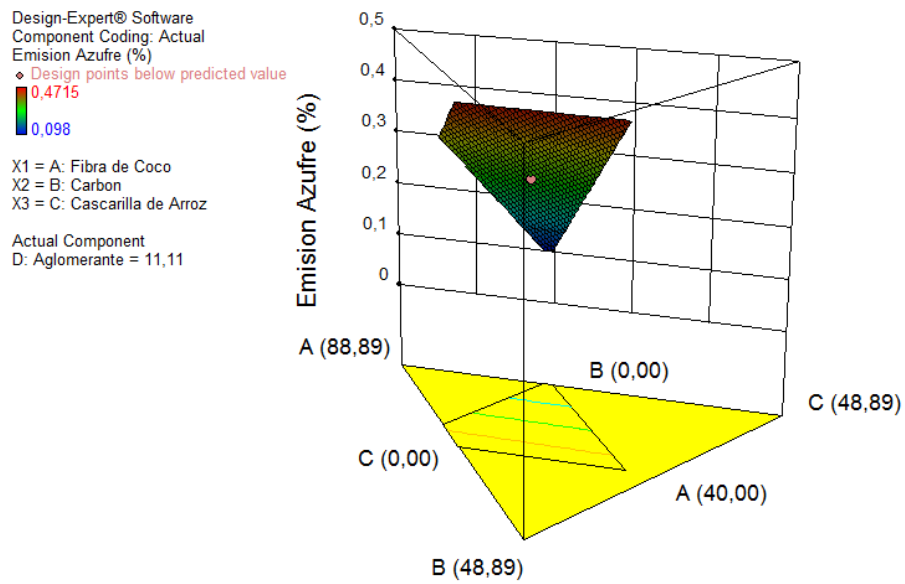


Gráfica 10: Resultados del cálculo de emisiones de azufre para cada corrida.

Fuente: Autores (2016). Microsoft® Excel 2013.

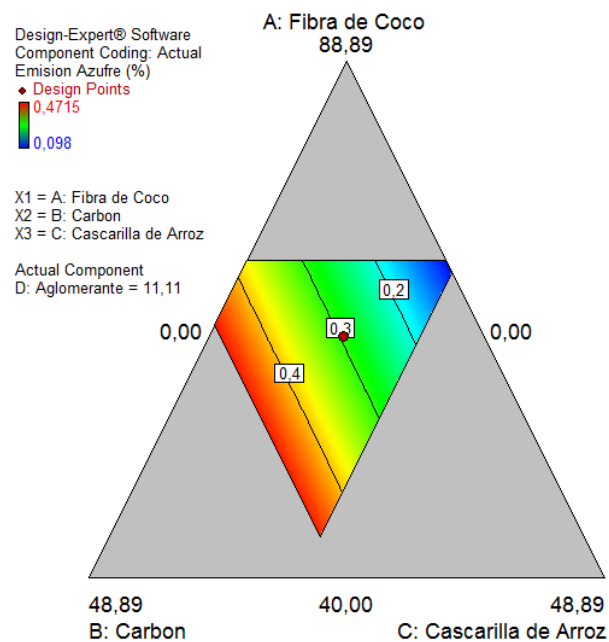
3.2.3.2 Superficie de respuesta y gráfico de contorno

Analizando las gráficas 11 y 12, se afirma al igual que como sucedió con el poder calorífico de cada briqueta, que las emisiones de azufre aumentan a medida que se incrementa el porcentaje de carbón en las mezclas. También se observa que las emisiones de azufre no sobrepasan el valor de 1%, tal como se busca en esta investigación.



Gráfica 11: Superficie de respuesta para las emisiones de azufre.

Fuente: Autores (2016). Design Expert versión 10.



Gráfica 12: Gráfico de contorno para las emisiones de azufre.

Fuente: Autores (2016). Design Expert versión 10.

3.2.4 Aglomerante de yuca

Observando con detalle todas las gráficas de contorno y superficies de respuesta para cada variable, es notorio que el valor del aglomerante en cada uno de estos se encuentra

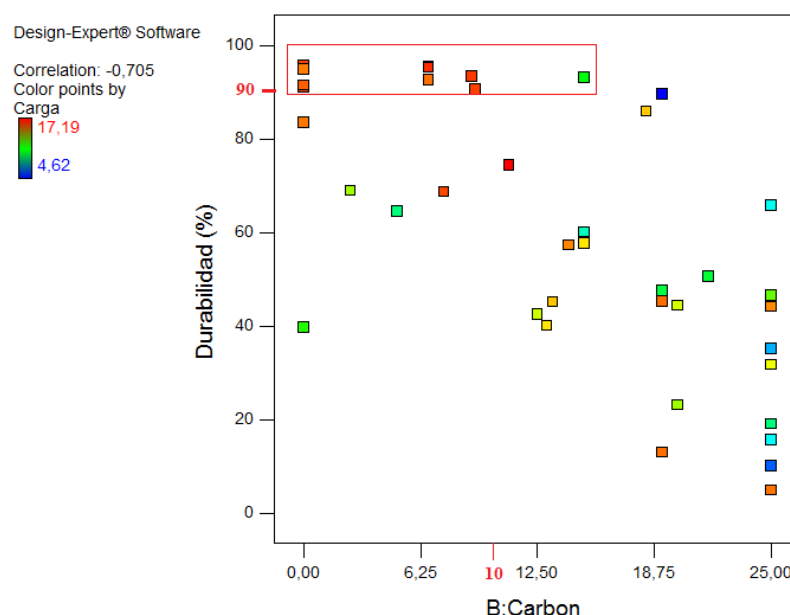
fijo en 11,1 %, esto se debe a que, de todos los 4 factores presentes en las mezclas, el aglomerante es el que menos efectos tiene en cada una de las variables de respuesta.

El software fija el porcentaje de aglomerante en 11,1 %, ya que este valor es el promedio del aglomerante total usado en cada una de las 40 corridas.

En el anexo D, se muestran las de correlación entre el aglomerante y cada una de las variables de respuesta; en donde se evidencia que no existe ninguna relación entre ellos, lo cual confirma que el aglomerante es el factor menos determinante del experimento.

3.2.5 Relación entre durabilidad y % de carbón

De las 11 briquetas que tuvieron una durabilidad mayor al 90 %, la mayoría de estas tenían porcentajes de carbón menor al 10%, es decir que mediante la gráfica 13 se puede comprobar una vez más que existe una correlación inversa negativa entre estas dos, ya que, a menor porcentaje de carbón en las mezclas, mayor será la durabilidad mecánica de las briquetas.

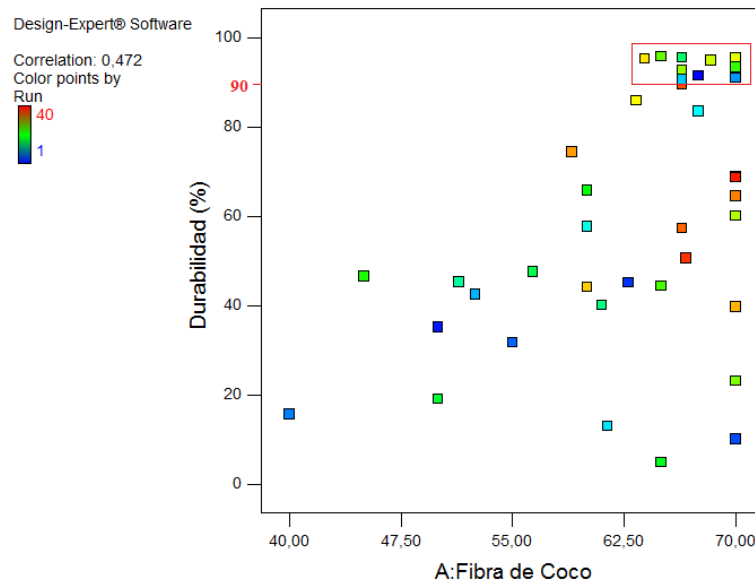


Gráfica 13: Durabilidad mecánica vs contenido de carbón.

Fuente: Autores (2016). Design Expert versión 10.

3.2.6 Relación entre durabilidad y la fibra de coco

Un resultado importante se presenta a partir de la gráfica 14, ya que en ella se muestra que todas las briquetas que tienen durabilidad mayor al 90%, también tienen porcentajes de fibra de coco superior al 63 %. Además, se muestra que en muchas otras mezclas igualmente hay altos porcentajes de fibra de coco, pero con durabilidad menor al 90 %, esto quiere decir que es necesaria pero no suficiente la presencia de altos porcentajes de esta biomasa para conseguir buena durabilidad mecánica de las briquetas hechas con la mezcla biomasa-carbón-aglomerante.

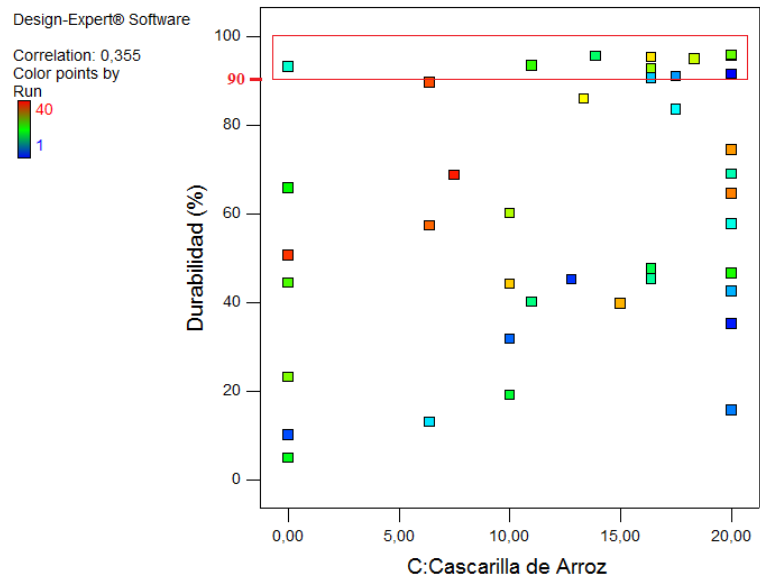


Gráfica 14: Durabilidad mecánica vs contenido de fibra de coco.

Fuente: Autores (2016). Design Expert versión 10.

3.2.7 Relación entre durabilidad y la cascarilla de arroz

A continuación, en la gráfica 15 se muestra que las briquetas que alcanzaron una durabilidad mayor al 90 % lo consiguieron con porcentajes de cascarilla de arroz muy variables entre mezclas, con rangos comprendidos entre 0-20 % de esta biomasa, esto quiere decir que no hay una correlación entre estas dos variables, pero analizando detalladamente el grafico se puede afirmar que se puede conseguir buena durabilidad con la máxima cantidad de arroz usada en este experimento.



Gráfica 15: Durabilidad mecánica vs contenido de cascarilla de arroz.

Fuente: Autores (2016). Design Expert versión 10.

3.2.8 Resumen

En la tabla 8 se detallan los valores máximos y mínimos que se obtuvieron para cada una de las variables de respuesta, así como sus promedios y las desviaciones estándar de cada una de éstas.

Tabla 8: Resumen de los valores obtenidos para cada variable de respuesta.

Fuente: Autores (2016)

VARIABLE	UNIDAD	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA	STD. DEV
Durabilidad	%	10,1	95,7	60,08	17,61
Resistencia a Compresión	Kgf	470,94	1752,29	13,19	0,95
Poder calorífico	MJ/Kg	15,307	17,905	16,62	0,000072

Emisiones de azufre	%	0,098	0,4715	0,30	0,0000126
---------------------	---	-------	--------	------	-----------

3.3 Mezclas favorables

Para determinar las mezclas favorables de las briquetas, se tomó como referencia los resultados de cada una de las variables de respuesta frente a diversas variaciones en los factores, además del objetivo inicial de la investigación, los cuales fueron de gran importancia para determinar el modelo de optimización. Los parámetros que se tuvieron en cuenta para llevar a cabo la optimización de las mezclas favorables se muestra en la tabla 9:

Tabla 9: Parámetros de optimización.

Fuente: Autores (2016). Design Expert versión 10.

Nombre	Objetivo	Límite inferior	Límite superior
Fibra de coco (%)	Maximizar	40	70
Carbón (%)	Maximizar	0	25
Cascarilla de arroz (%)	Maximizar	0	20
Aglomerante (%)	En el rango	5	15
Carga (KN)	Maximizar	4,62	17,19
Durabilidad (%)	Maximizar	90	100
Poder calorífico (MJ/Kg)	Maximizar	15,3	17,9
Emisiones de azufre (%)	Minimizar	0,098	1

Tabla 10: Mezclas favorables según la optimización.

Fuente: Autores (2016). Design Expert versión 10.

Numero	Fibra de coco	Carbón	Cascarilla	Aglomerante	Carga	Durabilidad	Poder calorífico	Emisiones	Deseabilidad	
1	61,2	7,7	20	11	17,1	100	16,1	0,214	0,671	Seleccionada
2	67,3	6,9	16,6	9,1	11,3	97	16,2	0,205	0,642	
3	70	7,1	14,4	8,3	10	93,6	16,27	0,21	0,589	

Según los criterios establecidos, se obtuvieron tres soluciones, de las cuales el software recomienda seleccionar la #1, sin embargo, es posible elegir cualquiera de las tres. Cabe resaltar, que todas las soluciones tienen valores en sus propiedades mecánicas

dentro de los considerados aceptables para briquetas. En cuanto al poder calorífico, la mezcla #3 es la que presenta un valor mayor, aunque no es significativa la diferencia de este valor con respecto a las otras dos soluciones.

Se observa que el porcentaje de carbón que recomienda el software es muy similar en las tres respuestas y las emisiones de azufre igualmente tienen valores similares y menores al 1 % como lo reglamenta la resolución 623, lo cual las convierte en una alternativa energética amigable con el medio ambiente.

Se puede afirmar que es posible darle uso a estas dos biomásas y al carbón mineral, para la elaboración de biocombustibles sólidos densificados, contribuyendo así a la utilización de estas dos biomásas, las cuales son una gran fuente de energía pero que actualmente no tienen ningún valor adicional para los productores; además de darle provecho al carbón de la región en esta mezcla, consiguiendo de esta manera briquetas con 700% menos en las emisiones de azufre en comparación con la de este mineral en estado puro. Finalmente, es posible aumentar el poder calorífico de las briquetas en comparación con el de la cascarilla de arroz, sin embargo, este aumento no es significativo.

4. Conclusiones

Se logró elaborar biocombustibles sólidos densificados (briquetas) a partir de la mezcla de biomasas residuales agroindustriales, carbón mineral y aglomerante de yuca.

Se evidencio que el carbón es el factor que más disminuye la durabilidad mecánica y la resistencia a la compresión de las briquetas.

Con la presión de compactación utilizada en esta investigación, se consiguió elaborar briquetas con una relación altura/diámetro menor a 2, con lo cual se consigue que la geometría final de la briqueta le otorgue alta resistencia a la compresión.

Fue posible elaborar briquetas con durabilidad y resistencia a la compresión aceptables con el máximo porcentaje de cascarilla de arroz usada.

La fibra de coco es una biomasa que le otorga excelentes propiedades mecánicas a las briquetas cuando es usado en altos porcentajes de masa en la mezcla.

El factor que menos efecto tuvo sobre las variables de respuesta fue el aglomerante de yuca, dado que su poder calorífico es menor que el de las biomasas y el carbón y su contenido de azufre es despreciable. Además, su rango de trabajo se mantuvo en menor proporción.

Analíticamente se logró establecer que ninguna de las diferentes mezclas superara el 1 % en las emisiones de azufre durante el proceso de combustión, lo cual convierte este tipo de briquetas en una alternativa atractiva como fuente de energía renovable.

Se consiguieron briquetas con propiedades mecánicas aceptables y con emisiones de azufre menor al 1%, con porcentajes de carbón inferior al 10%.

Para este tipo de briquetas, las mezclas favorables se obtuvieron a partir de porcentajes medios en el contenido de aglomerante (8-11%), contenidos altos de fibra de coco (62-70%) y cascarilla de arroz (14-20%) y contenidos bajos de carbón mineral (7%).

5. Recomendaciones

Usar la mayor presión de compactación suministrada por el equipo de trabajo con el que se cuente, para obtener briquetas con mejores propiedades mecánicas.

Determinar del poder calorífico y las emisiones de azufre experimentalmente, para obtener datos más precisos en cuanto a las propiedades energéticas de las mezclas.

Emplear una máquina briqueteadora automática para la elaboración masiva de briquetas de tipo industrial y de mayor calidad.

Realizar pruebas de gasificación para recolectar y analizar el gas pobre producido por las briquetas elaboradas.

6. Bibliografía

- Al-Shemmeri, T., Yedla, R., & Wardle, D. (2015). Thermal characteristics of various biomass fuels in a small-scale biomass combustor. *Applied Thermal Engineering*, 85, 243 - 251.
- Bamgboye, A., & Boluwafi, S. (2009). Physical characteristics of briquettes from guinea corn (sorghum bi-color) residue. *Department of Agricultural and Environmental Engineering*.
- Calderon, J. (1997). *Estudio de Aglomerantes para Obtención de Briquetas de Carbón Vegetal*. Ecuador.
- CEN. (2003). *Technical Specification: Solid Biofuels-Terminology, Definitions and Descriptions*.
- Cengel, Y., & Boles, M. (2008). *Termodinámica* (Vol. 6). McGraw Hill.
- Chin, O., & Siddiqui, K. (2000). Characteristics of some biomass briquettes prepared under modest die pressures. *Biomass and Bioenergy*, 18(3), 223-228.
- Conesa, J., Font, R., & Moreno, A. (2016). Physical and chemical evaluation of furniture waste briquettes. *Waste Management*, 49, 245-252.
- Córdoba, G. d. (2010). *Actividad carborífera en el municipio de puerto libertador*.
- DANE. (2011). *Encuesta nacional de arroz mecanizado*.
- Demirbas, K., & Sahin, A. (2009). Compacting of biomass for energy densification. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1063–1068.
- Fernández, J. (2004). Energía de la biomasa. *La Energía En Sus Claves*, 397-445.
- Fonseca, E., & Tierra, L. (2011). *Desarrollo de un proceso tecnológico para la obtención de briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz, y pruebas de producción de gas pobre*. Riobamba, Ecuador.
- Francis, O. (2015). Evaluation of the effect of palm oil mill sludge on the properties of sawdust briquette. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1749–1758.
- Garcia, S. (2012). *CENTRALES TERMOELÉCTRICAS DE BIOMASA*. España: Renovetec.
- Grover, P., & Mishra, S. (1996). Biomass Briquetting: Technology and Practice,. *Food and Agricultural Organisation of the United Nations*, 1-10.
- Kaliyan, R., & Morey, V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337–359.

- Kuehl, R. (2001). *Diseño de experimentos*. Arizona: THOMSON LEARNING.
- Li, Y., & Liu, H. (2000). High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. *Biomass Bioenergy*, 19(3), 177–186.
- Liu, C., & Wu, S. (2015). From biomass waste to biofuels and biomaterial building blocks. *Renewable Energy*, pp. 1-7.
- MacBain, R. (1966). Pelleting animal feed. *American Feed Manufacturing Association*.
- MADR. (2006). *Desarrollo de la fruticultura en Córdoba*. Montería.
- Mani, S., Sokhansanj, S., & Tabil, L. (2006). Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses Biomass Bioenergy. *ScienceDirect*, 30(7), 648-654.
- Miranda, A., & Oliver, R. (1996). *La combustión*. Barcelona: CEAC.
- Molina, A., & Molina, G. (1984). *Manual de eficiencia energética térmica en la industria*. Bilbao: CADEM.
- Montgomery, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. Arizona: Limusa.
- Muazu, R., & Stegemann, J. (2015). Effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and corn cobs. *ELSEVIER*, 133, 137-145.
- Oladeji, J., & Enweremadu, C. (2012). The effects of some processing parameters on physical and densification characteristics of corncob briquettes. *International Journal of Energy Engineering*, 2(1), 22-27.
- Ortega, J., & Berástegui, C. (2015). *Elaboración de biocombustibles sólidos densificados a partir de tres biomásas residuales, tres tipos de bioaglomerante y carbón mineral del departamento de Córdoba*. Montería - Córdoba: Universidad de Córdoba.
- Paredes, P. (2012). Los Bosques como Sistemas de Bioalmacenamiento y bioenergía. *CONAMA*.
- Satin, M. (1998). Functional Properties of Starches, Agricultural and Food Engineering Technologies Service. *Food and Agricultural Organisation (FAO)*.
- Stolarski, M., Szczukowski, S., Tworkowski, J., Krzyżaniak, M., Gulczyński, P., & Mleczek, M. (2013). Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass. *Renewable Energy*, 57, 20-26.
- Tumurulu, J., Wright, C., Hess, J., & Kenney, K. (2011). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels Bioprod. Biorefin*, 5(6), 683–707.

Turner, R. (1996). Bottomline in feed processing-achieving optimum pellet quality.
Feedstuffs, 46(12), 30–33.

UPME. (2005). *La cadena del carbón en Colombia*. Bogota D.C.

Anexos

Anexos A – Prueba de durabilidad mecánica

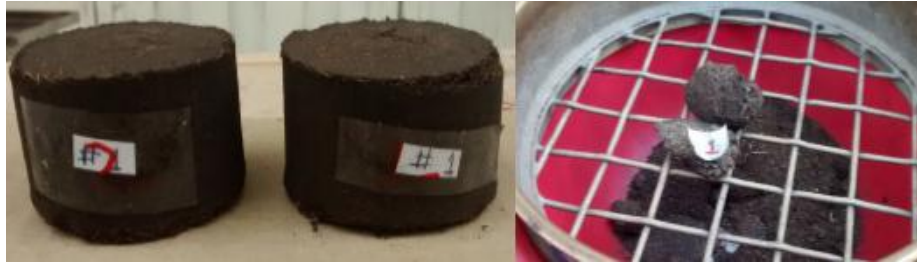


Figura 24: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #1.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 25: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #2.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 26: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #3.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 27: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #4.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 28: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #5.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

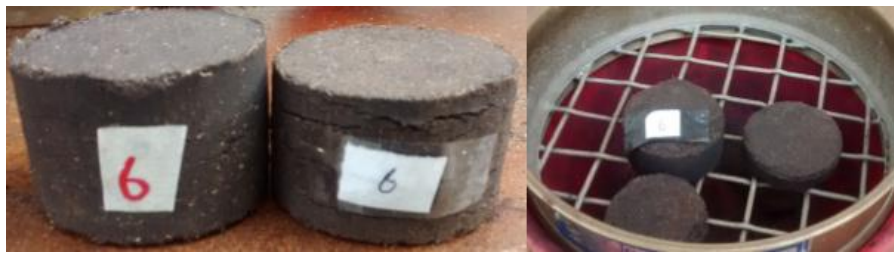


Figura 29: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #6.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 30: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #7.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 31: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #8.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 32: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #9.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 33: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #10.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 34: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #11.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 35: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #12.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 36: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #13.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 37: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #14.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 38: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #15.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 39: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #16.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 40: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #17.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 41: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #18.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 42: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #19.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

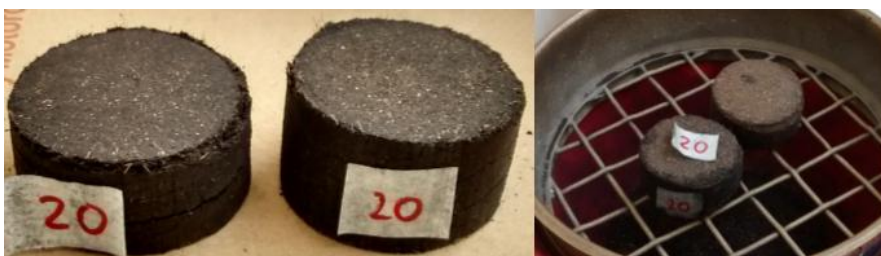


Figura 43: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #20.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 44: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #21.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

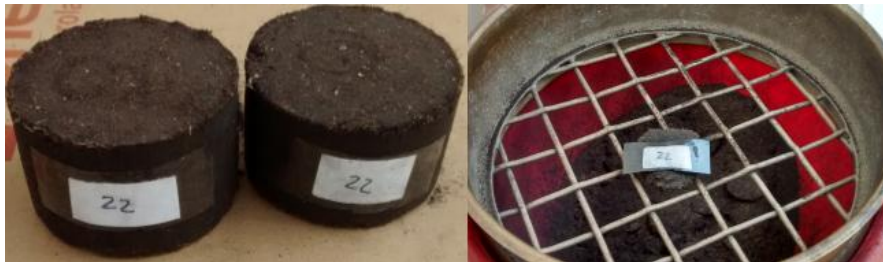


Figura 45: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #22.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 46: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #23.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 47: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #24.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 48: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #25.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 49: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #26.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 50: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #27.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 51: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #28.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 52: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #29.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 53: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #30.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 54: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #31.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 55: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #32.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 56: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #33.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 57: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #34.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 58: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #35.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 59: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #36.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 60: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #37.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 61: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #38.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

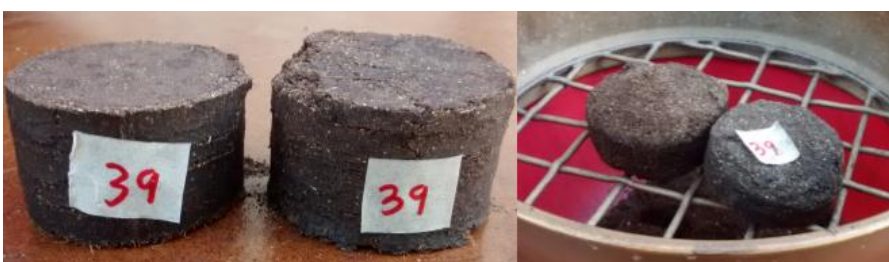


Figura 62: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #39.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 63: Prueba de durabilidad mecánica para la corrida #40.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

Anexos B – Prueba de resistencia a la compresión

B1 – Briquetas utilizadas en la prueba de compresión



Figura 64: Briquetas para prueba de compresión. a) corrida #1, b) corrida #2, c) corrida #3, d) corrida #4, e) corrida #5.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 65: Briquetas para prueba de compresión. a) corrida #6, b) corrida #7, c) corrida #8, d) corrida #9, e) corrida #10.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

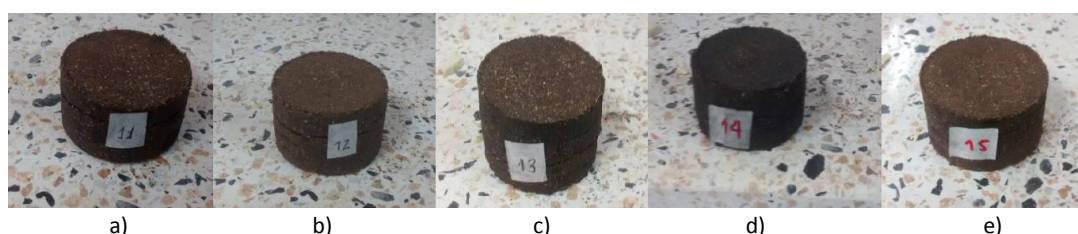


Figura 66: Briquetas para prueba de compresión. a) corrida #11, b) corrida #12, c) corrida #13, d) corrida #14, e) corrida #15.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

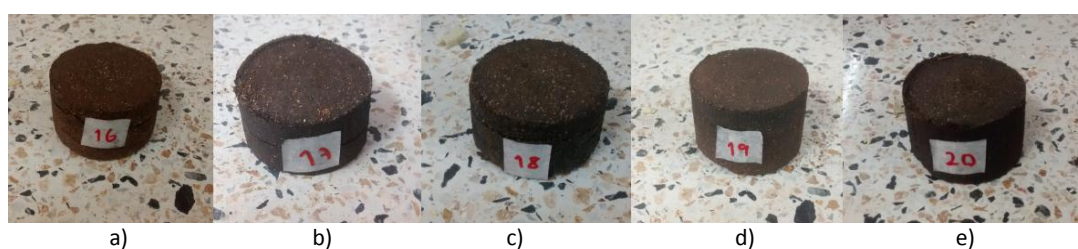


Figura 67: Briquetas para prueba de compresión. a) corrida #16, b) corrida #17, c) corrida #18, d) corrida #19, e) corrida #20.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

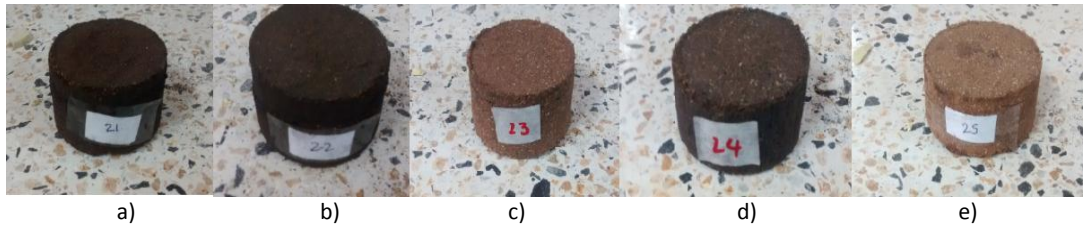


Figura 68: Briquetas para prueba de compresión. a) corrida #21, b) corrida #22, c) corrida #23, d) corrida #24, e) corrida #25.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

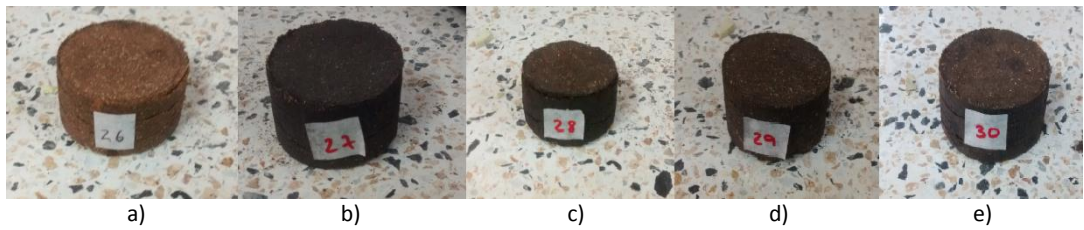


Figura 69: Briquetas para prueba de compresión. a) corrida #26, b) corrida #27, c) corrida #28, d) corrida #29, e) corrida #30.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

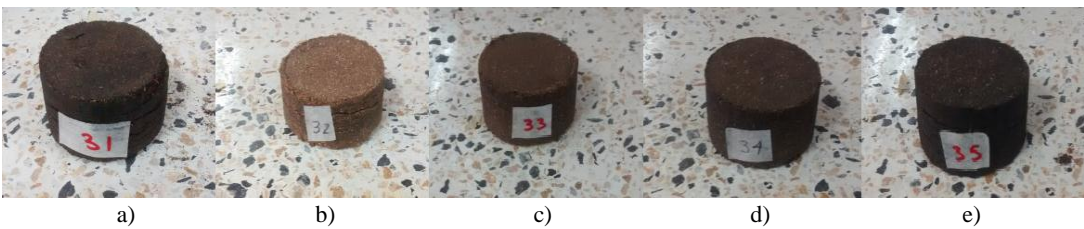


Figura 70: Briquetas para prueba de compresión. a) corrida #31, b) corrida #32, c) corrida #33, d) corrida #34, e) corrida #35.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

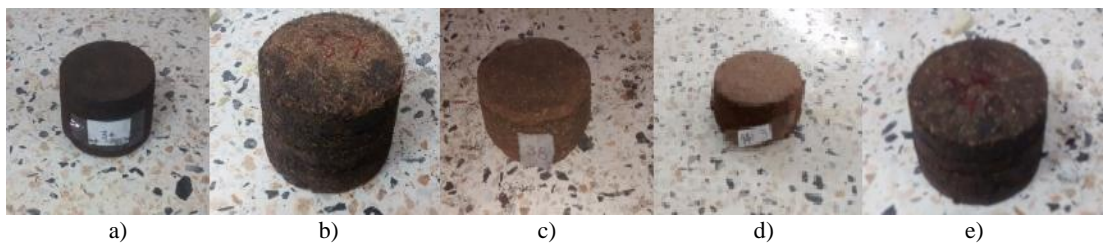


Figura 71: Briquetas para prueba de compresión. a) corrida #36, b) corrida #37, c) corrida #38, d) corrida #39, e) corrida #40.

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

B1 – Apariencia de las briquetas luego de la prueba de compresión



Figura 72: Briquetas después de su falla a compresión (I).

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 73: Briquetas después de su falla a compresión (II).

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 74: Briquetas después de su falla a compresión (III).

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 75: Briquetas después de su falla a compresión (IV).

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 76: Briquetas después de su falla a compresión (V).

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.



Figura 77: Briquetas después de su falla a compresión (VI).

Fuente: Autores (2016). Registro fotográfico.

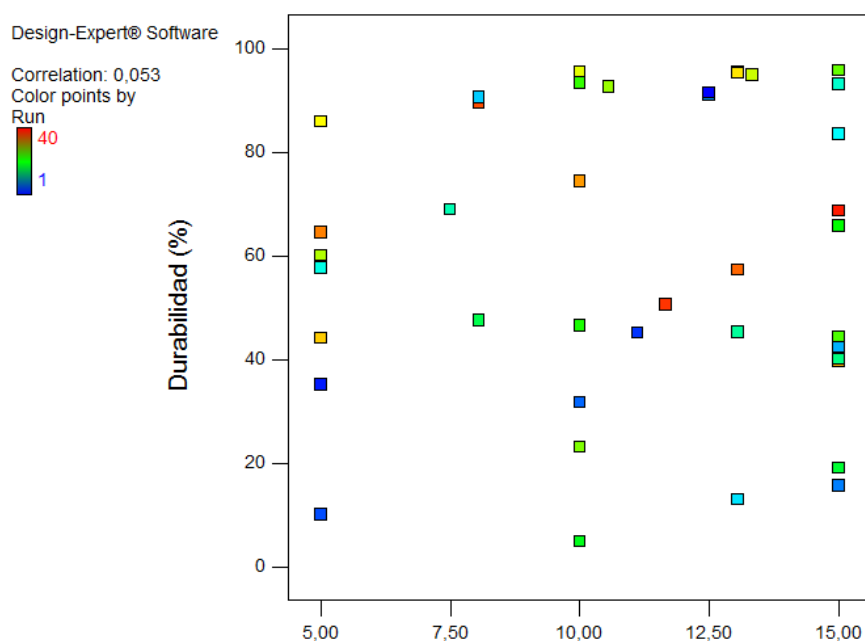
Anexo C – Resultados de las variables de respuesta

Tabla 9: Resumen de las variables de respuesta para cada corrida.

Fuente: Autores (2016). Design Expert versión 10.

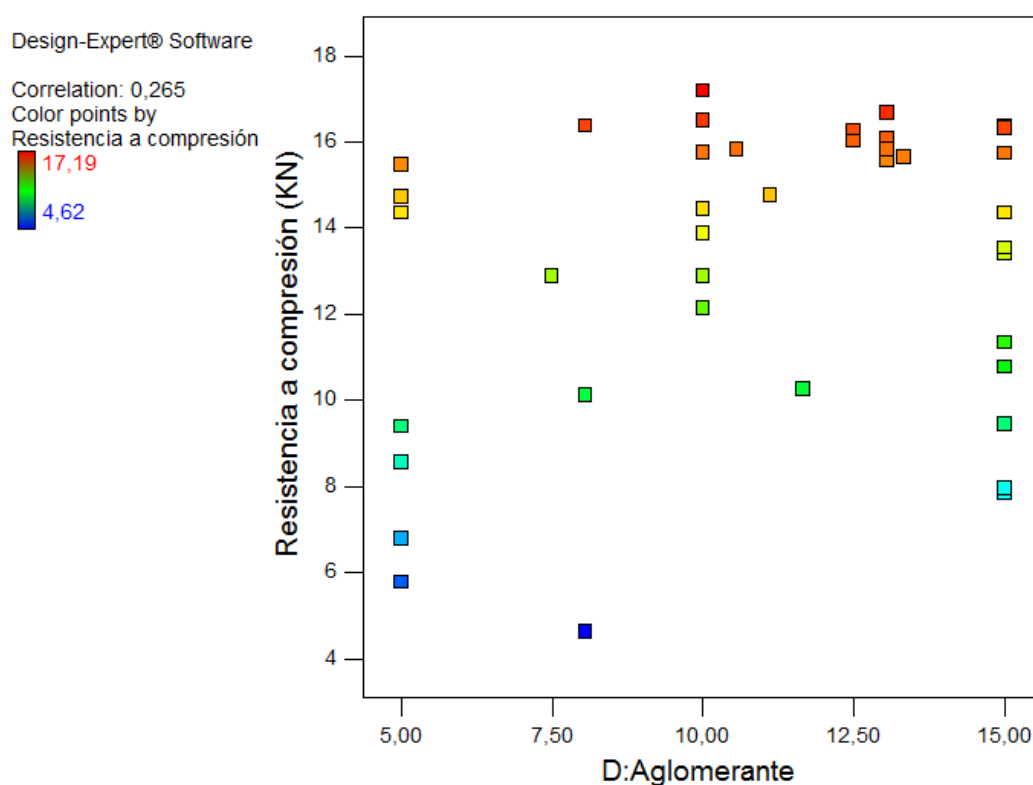
Corrida	Durabilidad mecánica (%)	Carga máxima (KN)	Poder calorífico (Mj/Kg)	% Emisiones (s)
1	10,1	5,78	17,9055708	0,4715
2	64,5	9,4	16,2838308	0,1815
3	94,5	14,45	15,6053168	0,104
4	35,1	6,78	17,805978	0,4675
5	15,6	7,83	17,2100236	0,4555
6	93,1	10,78	16,5485428	0,3165
7	39,6	11,35	15,3322378	0,099
8	65,7	7,95	17,3096164	0,4595
9	95,7	16,37	15,3073396	0,098
10	89,5	4,62	17,24771007	0,38313942
11	90,6	16,38	16,43683448	0,238138965
12	92,6	15,82	16,09758162	0,199388965
13	47,5	10,12	17,19791525	0,38113943
14	45,3	15,85	16,89994219	0,37513943
15	57,3	15,57	16,56920021	0,30563942
16	95,5	16,07	15,96104212	0,196888965
17	13	15,83	16,94973701	0,37713942
18	95,3	16,68	15,94859302	0,196388965
19	60	8,57	17,0947008	0,3265
20	44,1	15,48	17,8557744	0,4695
21	23,1	12,89	17,2270568	0,394
22	4,8	15,75	17,6075936	0,4655
23	68,9	12,89	15,9445738	0,14275
24	57,6	14,35	17,0449044	0,3245
25	90,9	16,26	15,4687773	0,1015
26	91,5	16,03	15,4563282	0,101
27	46,5	12,14	17,5080008	0,4615
28	19,1	9,45	17,25982	0,4575
29	42,5	13,42	16,2586816	0,27675
30	68,7	16,32	15,9403903	0,20775
31	44,4	13,54	16,9290796	0,388
32	83,5	15,74	15,3197887	0,0985
33	93,3	16,5	16,3350998	0,2345
34	85,9	14,72	17,33177453	0,37349941
35	31,7	13,87	17,5577972	0,4635
36	50,6	10,27	17,25459352	0,41583389
37	74,4	17,19	16,44249776	0,2613
38	94,9	15,64	15,41495058	0,10033326
39	40,1	14,35	16,34155204	0,2857
40	45,1	14,76	16,58962997	0,294731

Anexo D– Relación entre el aglomerante y las variables de respuesta.



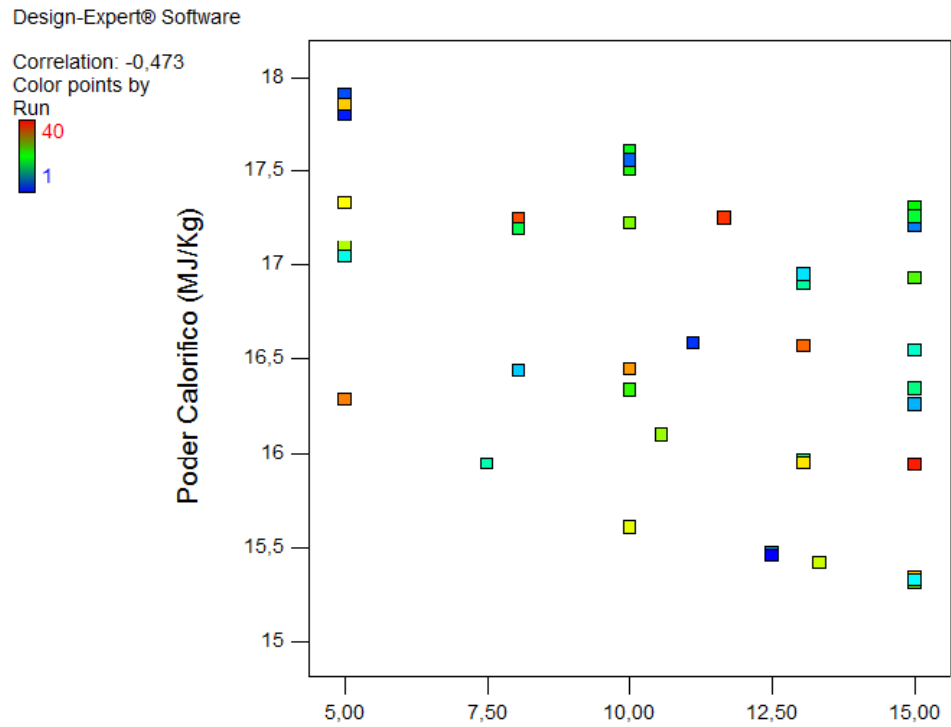
Gráfica 16: Relación entre la durabilidad mecánica y el contenido de aglomerante.

Fuente: Autores (2016). Design Expert versión 10.



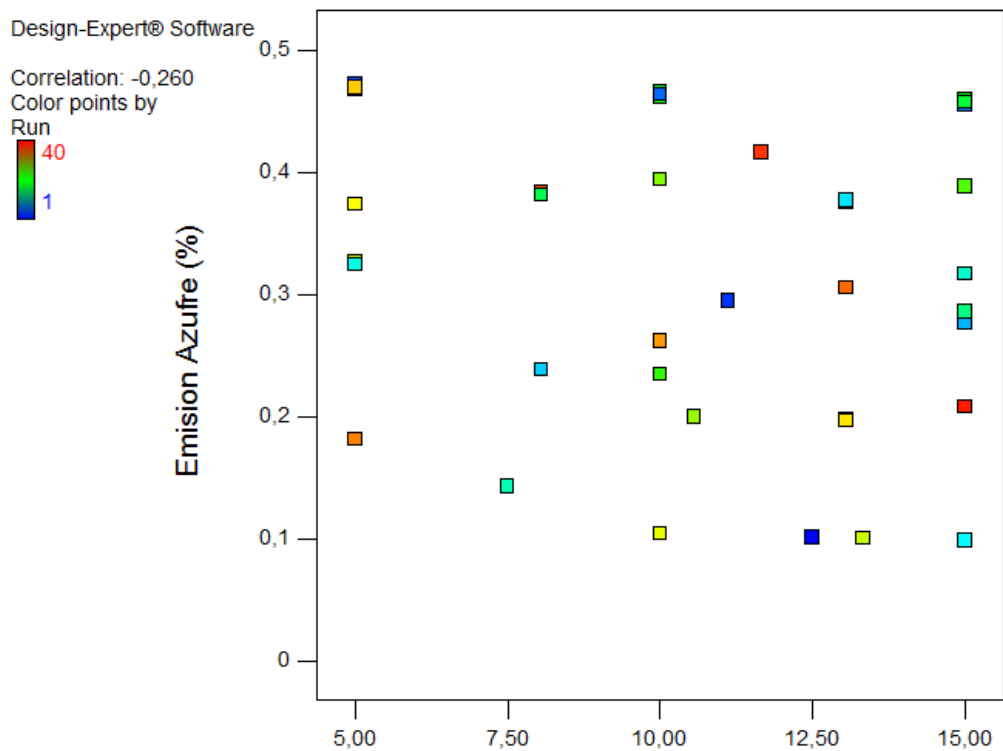
Gráfica 17: Relación entre la resistencia a compresión y el contenido de aglomerante.

Fuente: Autores (2016). Design Expert versión 10.



Gráfica 18: Relación entre el poder calorífico y el contenido de aglomerante.

Fuente: Autores (2016). Design Expert versión 10.



Gráfica 19: Relación entre las emisiones de azufre y el contenido de aglomerante.

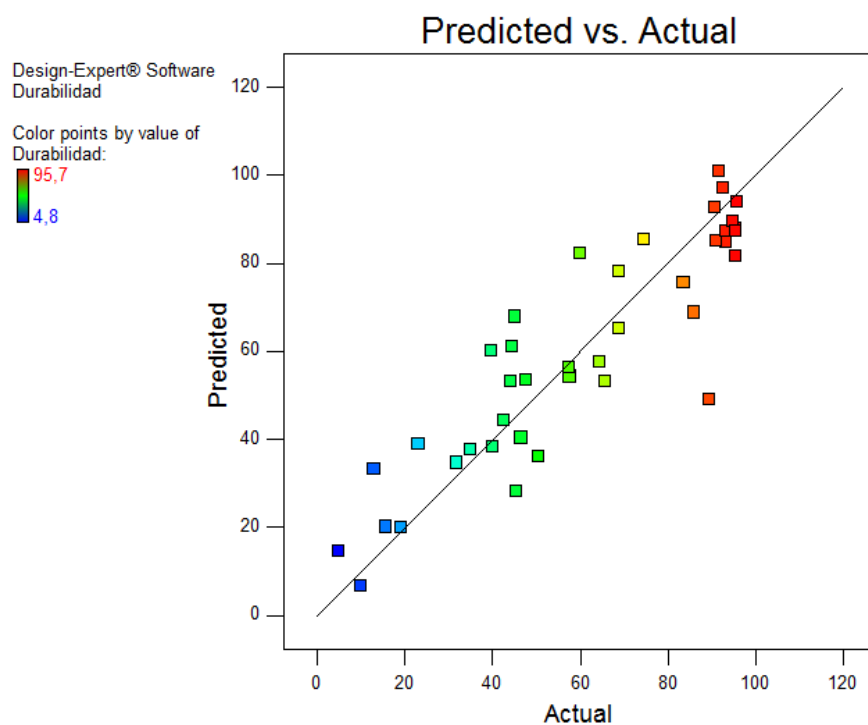
Fuente: Autores (2016). Design Expert versión 10.

Como se observa en los gráficos 16-17-18-19, no existe ninguna relación entre el contenido de aglomerante y cada una de las variables de respuesta, lo que quiere decir, que el aglomerante es el factor menos influyente para las variables de salida.

Anexo E- precisión de los modelos de regresión

E1- Modelo de regresión para la durabilidad mecánica de briquetas.

Los valores de respuesta predichos por el modelo de regresión para la durabilidad de las briquetas, se graficaron frente a los valores de respuesta actuales y a partir de ese resultado se pudo concluir que a pesar de que hay algunos valores atípicos en la gráfica, el modelo ofrece una relativa buena aproximación y predicción de la durabilidad mecánica para este tipo de briquetas.

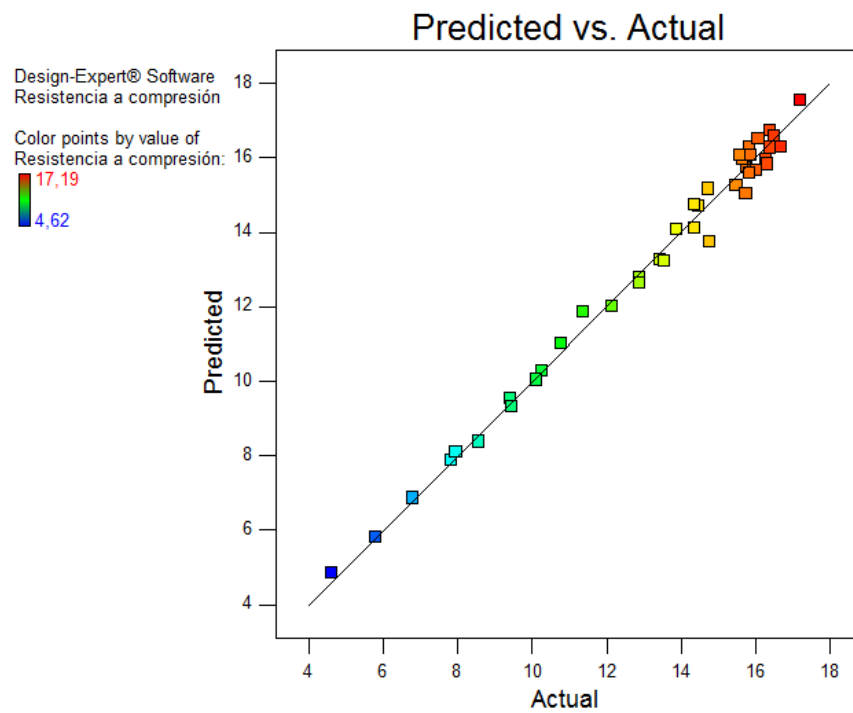


Gráfica 20: Precisión del modelo de regresión para la durabilidad mecánica de las briquetas.

Fuente: Autores (2016). Design Expert versión 10.

E2- Modelo de regresión para la resistencia a compresión de las briquetas.

Los valores de respuesta predichos por el modelo de regresión para la resistencia a la compresión de las briquetas, se graficaron frente a los valores de respuesta actuales y a partir de ese resultado se pudo concluir que existe una excelente aproximación y predicción de esta variable de respuesta.



Gráfica 21: Precisión del modelo de regresión para la resistencia a compresión de las briquetas.

Fuente: Autores (2016). Design Expert versión 10.